UNIVERSITÉ DE BORDEAUX II
Unité d'Enseignement et de Recherche d'Odontologie

Année 1973 Thèse : N° 2

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT DE TROISIÈME CYCLE DE SCIENCES ODONTOLOGIQUES

Présentée et soutenue publiquement le 8 Mars 1973

PAR

P.-F. CAITUCOLI
CHIRURGIEN-DENTISTE
Odontologiste du Service de Consultations et de Traitements dentaires
Professeur à l'U.E.R. d'Odontologie

Contribution à l'étude colorimétrique et fluorométrique des dents humaines et prothétiques

EXAMINATEURS DE LA THÈSE

M. P. BENOIT, Professeur . . . . . Président

M. R. LOCHET, Professeur . . . . . } Assesseurs

M. P. FOURTEAU, Professeur . . . . . }

Éditions Bergeret, 71, rue Leyteire - BORDEAUX
— Tél. 91.12.59 —

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547309_0015

UNIVERSITE DE BORDEAUX II

PRESIDENT : M. H. BRICAUD
VICE-PRESIDENTS : MM. R. STOLL, Cl. BERAUD, E. SICARD

UNITE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

DIRECTEUR : M. P. BENOIT
DIRECTEUR-ADJOINT : M. J. SECHET

. 0 .

PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.E.R.

Professeurs 1er Grade

P. BOUSSAGOL	*Biologie et Matières fondamentales*
F. CAITUCOLI	*Biologie et Matières fondamentales*
J. DULUC	*Pathologie et Thérapeutique dentaires*
R.G. GUDIN	*Orthopédie dento-faciale*
M. LACAZEDIEU	*Dentisterie opératoire*

Professeurs 2ème Grade

J.P. BELAIR	*Dentisterie Opératoire*
G. BERTRAND	*Pathologie et thérapeutique dentaires*
Ph. BOUTONNET	*Biologie et Matières fondamentales*
G. BRUN	*Pathologie et thérapeutique*
P. BRUNET	*Pathologie et thérapeutique*
J. DARQUE	*Orthopédie dento-faciale*
R. FERRAN	*Prothèse*
Mme FOURTEAU J.	*Orthopédie dento-faciale*
P. FOURTEAU	*Prothèse*
H. HUGUET	*Dentisterie Opératoire*
J. LUSSAC	*Prothèse*
J. ROUGE	*Dentisterie Opératoire*
J. SECHET.....	*Dentisterie Opératoire*

Assistants

Mle	ARRAMON-BERDOT M.	*Prothèse*
R.	BARRAILLEY-GUENARD	*Dentisterie Opératoire*
J.	BATIFOUYE.....	*Prothèse*
J.F.	BEQUAIN	*Biologie*
A.	BOUDAT.....	*Pathologie et thérapeutique dentaires*
R.	BOUGUES.....	*Orthopédie dento-faciale*
G.	BOURGEOIS	*Dentisterie Opératoire*
P.	CALLEDE.....	*Prothèse*
J.	CASTEIGT	*Orthopédie dento-faciale*
H.	COULAUD	*Prothèse*
J.	DAVID	*Prothèse*
J.	DESPORTES	*Dentisterie Opératoire*
Ph.	DUBOURG	*Prothèse*
Mle	DUGUET J.	*Dentisterie Opératoire*
Mle	DUHART A.M.	*Orthopédie dento-faciale*
G.	DORIGNAC	*Dentisterie Opératoire*
J.P.	FABARON	*Orthopédie dento-faciale*
J.	GEOFFRION	*Prothèse*
Mle	GODARD B.	*Orthopédie dento-faciale*
N.	HOLCHAKER	*Dentisterie Opératoire*
Y.	KERMARREC	*Pathologie et thérapeutique dentaires*
J.M.	LUEZA	*Orthopédie dento-faciale*
R.	MONSEAU	*Dentisterie Opératoire*
J.	PELOTIER	*Pathologie et thérapeutique dentaires*
F.	PIERRE	*Pathologie et thérapeutique dentaires*
A.	PUJOL	*Orthopédie dento-faciale*
L.	RIVIERE	*Dentisterie Opératoire*
Y.	TAJAN	*Biologie*
J.	TARAYRE	*Prothèse*
J.C.	VERGER-PRATOUCY	*Biologie*
J.P.	VINCENT	*Dentisterie Opératoire*

AUTRES ENSEIGNANTS

P.	BENOIT
J.P.	BENOIT
G.	COHERE
H.	CORTOT
	FERRON
F.	FESTAL
J.	GIRONET
E.	JOUZIER
M.	KHALEF
J.	LAULAN
H.	LAZARINI
	LE METAYER
X.J.	MICHELET
G.	MOUSTARDIER
	MUR
J.	PACCALIN
	PLAGNOL
R.	QUILICHINI
J.	RECHENMANN
A.	SERISE
	TARRAUBE

UNIVERSITÉ DE BORDEAUX II
Unité d'Enseignement et de Recherche d'Odontologie

Année 1973

Thèse : N° 2

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT DE TROISIÈME CYCLE DE SCIENCES ODONTOLOGIQUES

Présentée et soutenue publiquement le 8 Mars 1973

PAR

P.-F. CAITUCOLI
CHIRURGIEN-DENTISTE
Odontologiste du Service de Consultations et de Traitements dentaires
Professeur à l'U.E.R. d'Odontologie

Contribution à l'étude colorimétrique et fluorométrique des dents humaines et prothétiques

EXAMINATEURS DE LA THÈSE

M. P. BENOIT, Professeur . . . . . Président

M. R. LOCHET, Professeur . . . . . } Assesseurs

M. P. FOURTEAU, Professeur . . . . . }

Éditions Bergeret, 71, rue Leyteire - BORDEAUX
— Tél. 91.12.59 —

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

A MA FAMILLE

A MES MAITRES

A MES AMIS

Au Professeur FLEURY

Qui a su provoquer l'éveil de notre intérêt pour la colorimétrie.

Au Professeur BLOTTIAU

Qui nous a permis de satisfaire notre désir de connaissances sur ce sujet

Au Professeur Y. LE GRAND

Dont le message écrit nous a constamment guidé au cours de nos investigations.

Très sincèrement merci.

A MES JUGES

Monsieur le Professeur P. BENOIT

Professeur de Clinique Odonto-stomatologique
Directeur de l'U.E.R. d'Odontologie de Bordeaux
Stomatologiste des Hôpitaux, Chef de Service
Officier des Palmes académiques

Après m'avoir enseigné la prothèse dentaire, vous avez toujours manifesté à mon égard la plus grande sollicitude, votre sympathie m'a été infiniment précieuse. Veuillez trouver ici le témoignage de ma gratitude et de mon dévouement.

Monsieur le Professeur LOCHET

Docteur ès Sciences Physiques
Professeur à l'Université de Bordeaux I
Laboratoire d'Optique moléculaire
Officier des Palmes académiques

Vous avez eu la bonté non seulement de m'accueillir dans votre laboratoire mais encore de m'apporter votre concours permanent, avec la simplicité de ceux dont le savoir n'a d'égal que la modestie. Veuillez croire à toute ma reconnais - sance.

Monsieur le Professeur FOURTEAU

Professeur à l'U.E.R. d'Odontologie de Bordeaux
Docteur en Chirurgie dentaire
Diplômé d'Etudes Supérieures en Sciences Naturelles
Chef du Département de Prothèse
Médaille d'Or de la Jeunesse et des Sports

Vous avez tout fait pour faciliter mon intégration lors de mon arrivée dans le service de Prothèse en m'offrant spontanément votre amitié. Soyez assuré de la mienne, que vous n'avez jamais déçue.

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE COLORIMÉTRIQUE ET FLUOROMÉTRIQUE DES DENTS HUMAINES ET PROTHÉTIQUES

*

S O M M A I R E

Pages

PREMIERE PARTIE 2

I - CONSIDERATIONS GENERALES 3

A - Caractère particulier des teintes dentaires 3
B - Attributs physiologiques de la couleur 5
C - Couleur des objets 6
D - Principes généraux de l'analyse des couleurs 9
E - Relation entre la lumière incidente et la réflectance de l'objet 10

II - LES SOURCES LUMINEUSES PRIMAIRES 12

A - Température de couleur du corps noir 12
B - La lumière du jour 13
C - La lumière artificielle 14
D - Les lumières étalons 15

III - LES SOURCES LUMINEUSES SECONDAIRES 19

A - Etude de la formation des lumières colorées par transmission ou réflexion sélective 19
B - Coloration par transmission 19
C - Coloration par réflexion 20

IV - EFFET PHYSIOLOGIQUE DES RADIATIONS LUMINEUSES 25

A - Relations entre les unités énergétiques et lumineuses 25
B - Coefficients de visibilité relative et courbe de visibilité 26
C - Propriétés des luminances 27
a) Loi d'Abney 28
b) Expression du flux lumineux 28
c) Relation entre les flux énergétiques et lumineux dans le cas des lumières polychromatiques 29
d) Lois de Grassmann 30
e) Facteur de pureté d'une lumière 31
f) Définition conventionnelle de la lumière blanche 32

V - CONVENTION DE LA SYNTHESE TRICHROME 33

A - Reproduction d'une lumière colorée par addition 33
B - Définition du flux chromatique 36

Pages

C - Généralisation de la synthèse trichrome 38
D - Evolution de la synthèse trichrome 39
a) Maxwell 39
b) R. G. B. 40
c) International 42

VI - REPRESENTATION DES COULEURS DANS LE TRIANGLE X. Y. Z 45

A - Les coefficients de distribution 48
B - Utilisation des ordonnées sélectionnées 49

VII - COLORIMETRIE INSTRUMENTALE 51

A - Détermination de la couleur à partir de la répartition spectrale 52
B - Détermination de la réflectance ou facteur intégral de luminance 53
C - Influence de la réflectance sur l'attribut psychologique de la couleur 53

VIII - COLORIMETRIE VISUELLE PAR COMPARAISON 57

A - volume des couleurs d'Ostwald 58
B - Atlas de Munsell 59

DEUXIEME PARTIE 62

I - INTRODUCTION A L'EXPERIMENTATION 63

II - ADAPTATION D'Un SPECTROFLUOROMETRE AMINCO à la détermination de la répartition spectrale des luminances des dents 65

III - CHOIX DE LA GEOMETRIE DE MESURE 67

A - Montage initial utilisant la géométrie la plus simple.. 68
1°/ Disposition des dents suivant la géométrie choisie.. 68
2°/ Détermination des facteurs de réflexion diffuse à partir des enregistrements 69
3°/ Détermination des coordonnées dans le triangle international à partir des enregistrements obtenus 74

B - Utilisation d'un densitomètre de géométrie 0/45° pour la mesure des réflectances 82

Pages

C - Analyse des résultats obtenus par les méthodes précédentes 84
D - Réalisation et adaptation d'une sphère photométrique sur spectrofluoromètre Aminco 85

IV - DETERMINATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA TEINTE 88

1°- Exploitation des courbes de répartition spectrale des luminances et 88
Tracé des courbes des facteurs de réflexion diffuse.. .. 88
2°- Calcul des tristimuli correspondant à l'examen des surfaces éclairées par une source déterminée 88
3°- Obtention des coordonnées trichromatiques 91
4°- Détermination de la réflectance 98
5°- Calcul de la longueur d'onde dominante 98
6°- Calcul de la pureté d'excitation 102-

V - EVOLUTION DES ATTRIBUTS PSYCHOLOGIQUES DE LA COULEUR en fonction de l'éclairement et de la leucie 104

VI - REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS OBTENUS 107

VIII - ETUDE DE LA FLUORESCENCE DES DENTS 126

1°- Utilisation d'un spectrographe à prisme et d'un secteur tournant logarithmique 127
2°- Utilisation du spectrofluoromètre à réseau Aminco 129

CONCLUSIONS 132

BIBLIOGRAPHIE 136

EDITIONS BERGERET - 2, rue Bergeret - 71, rue Leyteire - 33000 BORDEAUX
Tél. 91.12.59

PREMIERE PARTIE

CONSIDERATIONS GENERALES

A - CARACTERE PARTICULIER DES TEINTES DENTAIRES

Etudier la teinte des dents présente, a priori, de nombreuses difficultés étant donné les variations que l'on peut constater du collet au bord libre dans les conditions d'observation normales . Il ne peut être question, par conséquent, de considérer la teinte d'une surface dentaire comme uniforme .

L'impression subjective donnée par la vision n'est d'ailleurs que la sommation de toute une série de phénomènes où interviennent la réflexion, la réfraction; la diffusion sélective, pour ne citer que les plus importants . Devant la multitude de ces paramètres , une portion élémentaire de la surface dentaire est déjà différente de celle qui lui est immédiatement voisine .

Si l'on ajoute à cela les caractères particuliers dûs à la carie, à la pigmentation tabagique ou médicamenteuse, à la diffusion des oxydes ou sulfures métalliques, au niveau des collets, des surfaces abrasées ou des fissures d'émail, on est conduit à penser que la reproduction idéale ne peut être réalisée qu'en empruntant une voie purement artistique .

Dans ce cas, on cherche à parvenir à la similitude par l'usage d'artifices qui ont pour but de créer une impression d'identité en donnant lieu à une sensation subjective analogue à celle donnée par l'objet reproduit .

On doit reconnaître, cependant, que la teinte est une préoccupation importante dans notre recherche, puisque nous retrouvons ce terme appliqué à des dents artificielles, à des produits d'obturation ou à des produits céramiques par comparaison à celle des dents naturelles .

Il y a donc là une notion qui s'impose et bien que difficile à cerner n'en est pas moins un facteur important de succès dans nos réalisations .

Le but de cette étude n'est donc pas de prétendre remplacer le concept esthétique par une exécution purement mécanique, mais plutôt d'essayer de mettre en évidence les facteurs les plus importants permettant d'obtenir les éléments d'appréciation indispensables à une reproduction correcte de la teinte aussi fidèle que possible, sans pour cela rejeter l'apport complémentaire souhaitable dans bien des cas qui relève de l'art dans son sens le plus large .

Si l'on examine une coupe d'incisive par exemple, on constate que la teinte de cette dernière est la résultante de la lumière qui vient diffuser sur une dentine de teinte sensiblement homogène après avoir traversé une couche d'émail d'épaisseur variable . C'est près du collet que la dentine est le plus visible et que la couleur jaune est dominante, alors que près du bord incisif on ne trouve plus que de l'émail qui conditionne l'aspect de cette région .

D'où, tout naturellement, la division bien classique en trois régions : le collet, le bord incisif et la zone intermédiaire .

Si l'on considère le bord incisif, on voit que non seulement l'épaisseur, mais la qualité de l'émail interviennent également . C'est ainsi que la teinte résultante dépend non seulement de la couche d'émail à ce niveau, mais encore de son degré de translucidité .

- Un émail dont le degré de minéralisation, l'hydratation et la qualité de la substance interprismatique aboutissent à une quasi transparence, donne un bord incisif qui apparaît en bouche comme gris-bleuté ; gris en raison du fort pourcentage de lumière transmise vers la cavité buccale où elle se perd, et bleuté en raison de la diffusion plus importante de radiations de courte longueur d'onde . L'effet Rayleigh est en effet inversement proportionnel à la quatrième puissance de cette dernière .

- Un émail peu translucide donne lieu à une quantité de lumière rétrodiffusée beaucoup plus grande , le gris est bien moins important et la diffusion de radiations de courte longueur d'onde est moins apparente .

L'impression de naturel donnée par une restauration sera d'autant plus proche de la réalité que l'on se rapproche davantages des

conditions relles dans le parcours de la lumière . Ceci n'exclue pas que l'on puisse ultérieurement avoir recours à quelques retouches complémentaires pour parfaire la ressemblance .

Si l'on considère maintenant la région proche du collet , nous avons là une zone qui correspond à la teinte que l'on attribue à la dent puisque c'est à ce niveau que l'influence de la dentine est la plus forte au travers de la couche d'émail . C'est cette teinte qui va aller en dégradé jusqu'à la région incisive , l'importance du dégradé étant fonction de la qualité et de l'épaisseur locale de l'émail, comme on vient de le voir .

Un émail translucide et peu épais, donne lieu à une teinte résultante où l'influence de la dentine est prédominante et la dent apparaît jaune . Au contraire, un émail plus opaque masque davantage la dentine et donne une dent d'aspect plus blanc que le type précédent.

Après avoir écarté les particularités locales, telles que les fissures, caries et pigmentations de tout ordre, non sans en avoir reconnu l'importance dans la recherche d'une reproduction plus parfaite, après avoir tenu compte du rôle de l'émail dans le dégradé de la teinte apparente, nous pouvons essayer de parvenir à une meilleure définition des facteurs régissant la sensation subjective qui nous est donnée par cette région proche du collet qui correspond à ce que nous entendons le plus communément par teinte de la dent .

Ce sont les caractères colorimétriques et fluorométriques propres de cette région sur lesquels porteront, par conséquent, nos investigations .

B - ATTRIBUTS PHYSIOLOGIQUES DE LA COULEUR

La couleur est une impression subjective due à l'excitation des éléments sensoriels de l'œil se traduisant par des stimuli au niveau du cerveau qui les analyse et les traduit en donnant une sensation colorée .

Les cellules de l'œil sont sensibles à une bande assez étroite de radiations dont la longueur d'onde se situe, approximativement, entre 0,4 à 0,8 μ . Les excitations, qu'elles provoquent donnent lieu à des stimuli qui sont violets pour les courtes longueurs d'onde

et deviennent bleus, verts, oranges et enfin rouges, tandis que s'accroît la longueur d'onde excitatrice et que l'on parcourt le domaine de sensibilité de la vision colorée . De part et d'autre de ce domaine, les radiations ne sont plus perceptibles et correspondent aux régions de l'ultra-violet et de l'infrarouge .

Toutes les sensations colorées perceptibles sont donc le fait de l'excitation des cellules sensorielles de l'œil par un ensemble de radiations de longueur d'onde bien précise .

Comme pour les autres sens, le seuil de perception présente une certaine variation d'un individu à l'autre tant en ce qui concerne la discrimination des couleurs que l'étendue de leur domaine . Il est possible, cependant, de définir les valeurs moyennes qui correspondent aux capacités que par convention on attribue à l'œil moyen, dit normal . C'est à partir de cette convention de base que sont conduits les travaux qui tendent à édifier une théorie cohérente de la vision des couleurs et à établir les bases de la colorimétrie .

Parler des caractéristiques de l'œil sans autre précision sous-entend par conséquent que l'on se réfère à la définition précédente correspondant à une analyse normale d'une lumière colorée par l'œil moyen défini par convention de la C. I. E. (Commission Internationale de l'Eclairage) dont la courbe de visibilité est le résultat de la moyenne d'un grand nombre de mesures sur des individus différents .

C - COULEUR DES OBJETS

La sensation colorée étant le résultat de stimuli ayant le rayonnement pour origine, la couleur que l'on attribue à un objet n'est en fait que la résultante de l'analyse par le sens visuel des radiations qui en proviennent .

Les matériaux , à la température ordinaire, n'ont, généralement, pas de rayonnement visible caractéristique qui leur soit propre si l'on fait abstraction de quelques cas particuliers de phosphorescence, ou de luminescence . Tout au plus rayonnent-ils quelque peu en raison de leur température, dans l'infrarouge lointain, donc, nettement hors de la région visible, on ne peut donc parler de la couleur intrinsèque des objets . Ils ne deviennent colorés qu'à partir du moment où ils sont éclairés par une source lumineuse dont ils diffusent ou transmettent sélectivement et avec plus ou moins d'intensité certaines radiations .

Leur couleur apparente dépend alors de la composition spectrale de cette source lumineuse et de la sélection effectuée .

La lumière, qui éclaire le plus fréquemment les corps qui nous environnent, étant celle du jour, c'est sous un tel éclairage que nous avons l'habitude de les observer et, par conséquent, de leur attribuer une couleur . Mais il est facile de constater qu'un même objet naturellement blanc lorsqu'il est observé à la lumière solaire, devient rouge sous un faisceau de projecteur émettant une lumière rouge, jaune sous un éclairage jaune, vert sous un éclairage vert, etc ..., ce qui met bien en évidence l'influence de la composition de la lumière incidente sur la couleur résultante . Lorsque l'observation a lieu à la lumière solaire directe un objet peut nous paraître blanc .

Nous obtenons dans ce cas un stimulus correspondant au blanc parce que toutes les radiations de la lumière solaire sont également diffusées ou transmises par l'objet avec une égale intensité et qu'il ne présente donc aucune absorption sélective .

Par contre, si certaines d'entre elles sont partiellement ou totalement absorbées, le stimulus résultant est alors différent du blanc et donne lieu à une sensation colorée, la lumière diffusée ou transmise par l'objet est de composition spectrale différente de celle de la lumière incidente en raison de l'absorption sélective d'un certain nombre de radiations .

Si l'absorption a lieu dans le bleu, par exemple, la couleur apparente est alors plus ou moins jaune sous l'éclairage diurne comme nous apparaissent normalement les dents naturelles ou artificielles, la lumière solaire diffusée et responsable de la couleur a subi une amputation, plus ou moins importante suivant le cas, à la fois globalement et sélectivement . Cette lumière provient, d'une part de réflexions pures, d'autre part de transmission suivie de réflexions internes qui la diffusent, l'absorbent partiellement, donc la colorent .

Cette modification du rayonnement responsable de la couleur peut être communément le fait d'une réflexion, d'une transmission ou de la diffusion . Un rayonnement frappant une surface métallique est surtout réfléchi mais peut, cependant, subir une absorption sélective .

Le même rayonnement transmis par un corps transparent peut également subir une absorption variable et la substance paraît alors colorée, dans ce cas l'absorption peut être très sélective et la couleur obtenue très pure, telle que celle des lumières transmises par les vitraux ou les pierres précieuses .

Enfin, la couleur des objets et des matériaux les plus fréquents qui sont opaques ou semi-opaques provient avant tout de la lumière diffusée .

C'est cette forme de diffusion sélective qui détermine la teinte fondamentale des dents, qu'elles soient naturelles ou artificielles . Dans ce cas, l'absorption n'est pas aussi franche qu'en lumière transmise, les couleurs sont généralement moins pures car une partie du rayonnement incident est également diffusé sans absorption .

Cette portion de lumière incidente réfléchie par diffusion peut être plus ou moins importante . A ceci peut s'ajouter la lumière réfléchie par la surface elle-même qui est d'autant plus grande que la surface est plus irrégulière, c'est ainsi que des cristaux colorés apparaissent de plus en plus blanchâtres au fur et à mesure qu'ils sont fragmentés . Il suffit, alors, de mouiller la poudre cristallisée avec un liquide non solvant ou un vernis pour diminuer l'importance de ce phénomène et redonner aux cristaux leur couleur première .

L'exemple le plus souvent choisi est celui du sulfate de cuivre qui est d'un beau bleu lorsqu'il est en cristaux de volumes importants, qui devient blanc par pulvérisation et reprend sa couleur initiale lorsqu'il est mouillé par un liquide non solvant .

C'est la raison pour laquelle une dent avulsée et abandonnée à la déshydratation voit sa teinte modifiée, tandis qu'elle devient plus opaque et plus diffusante, d'où, l'obligation, lors des mesures in vitro, d'opérer sur des dents maintenues humides, le temps imparti à la mesure étant réduit au minimum .

Bien que plus rarement, outre l'absorption sélective de la lumière réfléchie diffusée ou transmise, la lumière incidente peut être modifiée par interférence . On sait que deux rayons, issus d'une même source peuvent se trouver interférés , lorsqu'ils subissent une différence de marche et se trouvent en particulier en opposition ou en concordance de phase, ce qui se traduit par une diminution ou au contraire un accroissement de l'intensité des radiations dont la longueur d'onde correspond à la différence du chemin parcouru par chacun des rayons .

L'effet produit est généralement très beau, tel qu'on peut l'observer sur les ailes des papillons ou les plumes de certains oiseaux, sur les bulles de savon ou les films d'huile sur l'eau .

D - PRINCIPES GENERAUX DE L'ANALYSE DE LA COULEUR

La couleur étant une impression purement subjective, elle ne correspond pas à une grandeur physique nettement définie . Cette impression peut varier d'ailleurs suivant les conditions d'observation : l'éclairage, l'adaptation, le seuil d'intensité lumineuse, les effets temporels, les contrastes simultanés, l'étendue du champ d'observation, etc . . .

Pour ébaucher une étude sur la couleur, il est donc indispensable de préciser au maximum les méthodes d'observation . NEWTON, dans un esprit de simplification, a étudié les couleurs isolées . Le principe des couleurs films est excellent du point de vue physique mais prête à la critique du point de vue psychologique où le champ total de vision intervient pour modifier la sensation perçue, comme cela est indiscutable dans le phénomène du contraste simultané ou dans celui de la constance des couleurs et dans bien d'autres circonstances.

Les critiques de GOETHE à cet égard s'appuyaient sur des faits psychologiques indéniables . Ceci n'a pas empêché les physiciens de suivre la voie qui leur avait été tracée par NEWTON, YOUNG , MAXWELL, HELMOHLTZ, laquelle avait le mérite de permettre d'aborder ce problème, extrêmement complexe, de la vision des couleurs par une approche simplifiée .

Les méthodes de la photométrie hétérochrome appliquées à la colorimétrie ont permis de clarifier le problème, et bien que l'on sache pertinemment que le système prête à de nombreuses critiques, il a le mérite d'exister et comme le souligne Yves Le GRAND dans son excellent ouvrage d'optique physiologique : "Une fois l'observateur de référence numériquement défini, tous les hommes pourraient disparaître ou devenir aveugles, la colorimétrie n'en subsisterait pas moins" , bien qu'ayant, dès lors, perdu beaucoup de son intérêt , ajoute-t-il avec humour .

Dans notre cas, où le problème se complique de l'hétérogénéité du matériau, du dégradé des teintes, des propriétés particulières du bord incisif, il y a lieu de se placer dans le cas le plus simple d'un éclairement suffisant pour donner lieu à une vision photopique, l'observation ayant lieu à un niveau bien déterminé à savoir le tiers cervical .

E - REMARQUES SUR LES COULEURS DES DENTS

La couleur d'un objet, vu sous un certain éclairage, étant fonction du spectre de la lumière incidente et de l'absorption sélective de ces radiations par l'objet lui-même, on peut en déduire que deux corps ayant la même courbe d'absorption en fonction des longueurs d'ondes donneront toujours des sensations colorées identiques quelles que soient les compositions des lumières qui les éclairent .

Par contre, deux objets ayant des courbes d'absorption différentes pourront donner lieu à des stimuli identiques lorsqu'ils seront vus sous une certaine lumière et des stimuli différents dès que changera la composition de cette dernière . Ce mécanisme qui leur fait attribuer, dans certains cas, une égalité de teinte est fallacieux car il suffit de changer la source d'éclairage pour que l'œil normal puisse distinguer aussitôt une variation de la couleur en passant de l'une à l'autre .

Les différences sont encore accentuées lorsque l'œil normal est remplacé par d'autres systèmes analyseurs, tels que les caméras de télévision, les pellicules photographiques dont les plages de sensibilité peuvent être très différentes de celle de l'œil ,aussi bien pour ce qui est de l'étendue du spectre analysé que de la situation de son maximum .

Il faut donc constater que l'égalité de teinte de deux objets examinés sous une même lumière ne suffit pas pour assurer une identité de couleur sous d'autres éclairages et dans d'autres conditions .

Pour avoir la certitude d'obtenir des stimuli identiques en toutes circonstances, il est nécessaire que la répartition spectrale des facteurs de luminance des deux objets soit exactement la même dans toute l'étendue du domaine couvert par le système analyseur, qu'il soit biologique, électronique ou photographique .

Ceci explique que des dents artificielles qui s'assortissent parfaitement, soit avec d'autres dents artificielles, soit à des dents naturelles sous la lumière artificielle, présentent parfois des différences sensibles suivant la qualité de la source lumineuse, en particulier à la lumière du jour ou sous l'éclairage des lampes luminescentes qui ont un spectre de raies important .

Il faut également tenir compte de la fluorescence des dents naturelles qui, excitée par la fraction ultraviolette invisible de la lumière, restitue une partie de cette énergie sous forme de lumière visible qui vient se superposer à celle normalement diffusée par la dent . Cette fluorescence a lieu avec émission dans le bleu et concourt à lui donner plus d'éclat et de blancheur .

Cette participation de la fluorescence à la teinte est d'autant plus grande, évidemment, que le pourcentage d'ultraviolet dans la lumière incidente est plus élevé, c'est la raison pour laquelle elle devient plus particulièrement perceptible en montagne et sur la neige sous l'éclairage des sources fortement actiniques à spectre de raies dans l'ultraviolet comme on peut en trouver dans certains cabarets .

Il est indispensable, par conséquent, de préciser la qualité de la lumière sous laquelle l'objet observé donnera lieu à une sensation colorée déterminée . Pour cela, on utilise un certain nombre de sources de références bien définies qui correspondent aux principales conditions d'observation .

Ces lumières ont une répartition spectrale déterminant des stimuli analogues à ceux provoqués par l'observation du corps noir porté à une certaine température . On les caractérise donc par la température correspondante du corps noir .

Il faut remarquer ici que seuls les stimuli produits sont identiques, les répartitions spectrales étant, bien souvent, très différentes .

Avant donc, de préciser la nature et la composition des principales lumières, il est logique de mieux définir ce que l'on entend par l'émission du corps noir et la température de couleur correspondante .

LES SOURCES LUMINEUSES PRIMAIRES

A - TEMPERATURE DE COULEUR DU CORPS NOIR

Ainsi pour caractériser plus commodément certaines lumières, on les désigne par leur température de couleur.

En effet, un corps dont la température s'élève émet de l'énergie rayonnante de façon continue . Si ce rayonnement a lieu à surface découverte, il dépend de la température, mais également de la nature du matériau, alors qu'il ne dépend plus que de la température si celui-ci est un corps noir, c'est-à-dire qui absorbe, intégralement toutes les radiations qui lui parviennent quelle qu'en soit la nature ou la direction .

L'équivalent d'un corps noir peut être réalisé au moyen d'une cavité absolument close, sauf au niveau de l'ouverture par laquelle se fait l'observation . La nature du rayonnement dans ce cas est indépendante du matériau .

La radiance énergétique suivant la loi de Stefan est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue . D'où l'expression de la température à laquelle est portée le corps noir pour désigner le rayonnement qui en est issu .

Le corps noir idéal est formé par une sphère creuse ne comportant qu'une petite fenêtre comme relation avec l'extérieur, c'est par cette fenêtre que s'effectuent les observations . Toute radiation qui entre par l'ouverture dans la sphère ne peut en ressortir et se trouve totalement absorbée quelle que soit sa situation dans le spectre .

Lorsque l'intérieur de la cavité sphérique est porté à une température déterminée, le rayonnement qui est émis au niveau de la fenêtre ne dépend plus que de la température . On peut donc parler du rayonnement du corps noir à la température considérée .

A la température voisine de 6.000° absolus, le rayonnement du corps noir est très proche de celui du jour par ciel ouvert, c'est-à-dire que le maximum se situe sensiblement au milieu du spectre visible . On a , de ce fait, une relation par l'intermédiaire du corps noir entre l'émission d'un rayonnement déterminé et la température correspondante .

On définit ainsi une température de couleur K° que l'on exprime en degré Kelvin , correspondant à la température absolue à laquelle se trouve porté le corps noir .

B - LUMIERE DU JOUR

La lumière du jour est incontestablement la source la plus naturelle, sa composition n'est cependant pas constante et varie avec chaque moment de la journée, en fonction de l'altitude ou de la lattitude, pour ne citer que les facteurs les plus fréquents .

La température de couleur de la lumière solaire avant la traversée de l'atmosphère est de l'ordre de 6.200° K.

La répartition énergétique de cette lumière subit des variations, non seulement du fait de son parcours, mais encore de la façon dont elle atteint l'objet éclairé . Pendant le trajet, l'ozone absorbe la plus grande partie de l'ultraviolet ce qui limite à 300 mμ environ la longueur d'onde minima des radiations au sol, tandis qu'à l'autre extrémité du spectre les radiations infra-rouges sont absorbées par la vapeur d'eau . Le rayonnement solaire se trouve ainsi amputé d'environ 10 % de son énergie .

La diffusion moléculaire dans le cas d'une atmosphère pure et homogène modifie encore la répartition spectrale énergétique, mais cette fois-ci dans le visible, en diminuant le pourcentage de rayonnement de courte longueur d'onde dans la lumière directe qui devient plus jaune tandis que la lumière diffusée donne au ciel sa couleur bleue.

En fonction des modifications précédentes et suivant la façon dont elle parvient à l'objet, la lumière solaire peut se diviser en deux types : lumière directe et lumière indirecte . La seconde est plus bleutée et par conséquent de température de couleur beaucoup plus élevée .

Cette classification arbitraire permet de ramener à deux types l'infinité des lumières solaires possibles puisque l'épaisseur de l'atmosphère varie du zénith au lever ou au couchant, et que sa qualité est infiniment variable, ne serait-ce que par le degré hygrométrique ou les particules (poussières, fumées) en suspension .

C - LUMIERE ARTIFICIELLE

Après la lumière du jour, l'éclairage artificiel, le plus fréquent, est obtenu au moyen de lampes à incandescences . La composition de la lumière issue de cet éclairage varie, également en fonction de la température et de la nature du filament, mais généralement de façon continue et constamment croissante dans le sens des grandes longueurs d'onde .

Outre les lampes à incandescence , on utilise également des lampes fluorescentes . Dans ces dernières, un enduit fluorescent, excité par l'ultra-violet d'un arc à vapeur de mercure, émet une lumière qui vient compenser celle par trop bleue violacée de l'arc excitateur . Celui-ci a, en effet, un spectre de raies dont les principales sont : 253 - 313 - 365 - 405 - 436 - 546 - 578 mμ .

Des enduits fluorescents de silicate de zinc (vert) tungstène de calcium (bleu), borate de cadmium (rose) en proportion variable ou de tungstate de magnésium et de silicate de bérylium et de zinc donnent une composante blanche permettant de corriger le déséquilibre chromatique de l'arc au mercure .

On peut de cette façon obtenir toute une gamme de lumières présentant un spectre moyen de bande sur lequel apparaissent les raies correspondant au rayonnement excitateur .

On trouve également des lampes à vapeur de mercure, de sodium, d'halogénures , donnant des lumières qui s'écartent très nettement de la lumière solaire .

L'idéal serait d'avoir une source de lumière artificielle qui non seulement donnerait lieu à une impression subjective, analogue à celle de la lumière solaire directe ou indirecte, mais encore présenterait une répartition spectrale qui en serait très proche . Ceci permettrait d'éviter l'effet désastreux que peuvent produire certaines lumières à spectre de raies sur les couples métamères .

D - LUMIERES ETALONS

Etant donné les variations de la répartition spectrale d'énergie des sources d'éclairage courantes, on est, tout naturellement amené à sélectionner des lumières conventionnelles qui serviront d'étalon de référence permettant de définir, avec précision, la composition de la lumière incidente qui, suivant le cas, reproduiront au mieux les éclairages naturels ou artificiels les plus courants .

La source lumineuse de base est celle que fournit une lampe à incandescence de caractéristique bien définie . Le rayonnement qui en est issu représente le type de l'éclairage artificiel . En lui faisant subir une absorption sélective sur des filtres de caractéristiques bien précises, on parvient à lui donner une composition proche de la lumière solaire directe ou indirecte .

On obtient ainsi des standards définis des principales sources lumineuses que l'on désigne sous le nom d'illuminant A, B ou C .

1°- L'illuminant A, est donc une lampe à résistance de tungstène fonctionnant sous un régime tel que la température de couleur du filament soit de 2.848° Kelvin . Elle définit les caractéristiques de l'éclairage à incandescence type .

2°- L'illuminant B , correspond à la lumière A après passage sur des filtres correcteurs liquides de type B, constitués par deux cuves à faces parallèles de 1 cm d'épaisseur, contenant chacune une solution absorbante à base de sulfate de cuivre et de sulfate double de cobalt et d'ammonium, de concentrations telles qu'elles ont été définies par DAVIS et GIBSON .

On obtient ainsi une source dont la température de couleur est de 4. 880° Kelvin et dont la répartition spectrale est très proche de celle de la lumière solaire directe pour laquelle elle sert d'étalon . La fraction ultra-violette normalement présente dans cette dernière fait cependant défaut et ne peut, dans ces conditions, exciter la fluorescence .

Composition des filtres liquides B, C et E de DAVIS et GIBSON

Composants	*Etalon B*		*Etalon C*		*Etalon E*	
SO_4Cu, 5 H_2O	2,452 g	16,11 g	3,412 g	22,52 g	2,954 g	17,84 g
Mannite	2,452 g		3,412 g		2,954 g	
SO_4Co, $SO_4(NH_4)_2$, 6 H_2O		21,71 g		30,58 g		28,44
Pyridine	30 cc		30 cc		30 cc	
SO_4H_2, d : 1,835		10 cc		10 cc		10 cc
Eau q.s.	1000	1000	1000	1000	1000	1000

3°- L'illuminant C, est obtenu de même en modifiant simplement la nature des filtres liquides qui sont de type C dont les concentrations des sels de cuivre et de cobalt sont différentes des précédentes .

La température de couleur de la lumière ainsi obtenue est de 6.750° Kelvin environ et correspond à la lumière solaire avant traversée de l'atmosphère ou encore à la lumière du jour par ciel ouvert, mais dépourvu de sa fraction d'ultraviolet également .

4°- Les illuminants D, obtenus au moyen d'une lampe au xénon permettent d'obtenir un éclairement comparable à la lumière du jour comprenant la fraction ultraviolette moyenne . On peut définir plusieurs illuminants D suivant la température de couleur obtenue .

5°- L'illuminant E, résulte de la modification de la lumière A sur deux filtres de DAVIS et GIBSON de type E. Sa température de couleur de 5.500° Kelvin et bien que sa répartition spectrale soit différente de la source W dite d'égale énergie, elle donne sensiblement, une impression physiologique analogue .

6°- Sources fictives : ce sont les sources W et S.

La source W correspond à une lumière blanche, de référence située au centre de gravité du triangle chromatique et comprenant les mêmes proportions des trois fondamentales .

La source S est une lumière théorique obtenue en portant à λ^4 de chaque radiation de la lumière solaire . La lumière diffusée étant inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde, on obtient ainsi la composition de la lumière provenant d'un ciel idéalement bleu .

Le tableau suivant donne les répartitions énergétiques de la lumière solaire directe avant (I), après (II) traversée de l'atmosphère et de la lumière solaire indirecte (III) ainsi que des sources étalons A, B, C, E, respectivement IV, V, VI, VII .

(voir Tableau II page suivante)

Tableau II

Répartition spectrale énergétique relative des principales sources en fonction de la longueur d'onde dans le visible

Longueur / Longueur d'onde	Source I	Source II	Source III	Source IV	Source V	Source VI	Source VII
400	73,4	44,8	165	14,71	41,30	63,30	54,50
410	91,5	60,3	159	17,86	52,10	80,60	69,00
420	97,0	67,2	159	21,00	63,20	98,10	83,80
430	96,9	69,6	153	24,67	78,10	112,40	96,00
440	102,9	78,5	158	28,70	80,80	121,50	104,20
450	109,6	86,9	162	33,09	85,40	124,00	107,30
460	112,0	92,0	161	37,82	88,30	123,10	107,70
470	113,5	97,0	156	42,87	92,00	123,80	109,40
480	113,6	99,7	148	48,25	95,20	123,96	110,80
490	112,1	100,9	138	53,91	96,50	120,70	109,50
500	110,7	102,3	127	59,86	94,20	112,10	103,60
510	108,5	101,0	120	66,06	90,70	102,30	96,70
520	105,9	100,2	112	72,50	89,50	89,50	93,60
530	103,4	99,2	108	79,13	92,20	98,00	96,30
540	101,7	99,0	103	85,95	96,90	102,10	101,90
550	100,9	100,5	98	92,91	101,00	105,20	106,90
560	100,0	100,0	92	100,0	102,80	105,30	108,90
570	99,1	99,5	86	107,18	102,60	102,30	108,00
580	98,6	100,0	81	114,44	101,00	97,80	105,10
590	98,3	100,4	76	121,73	99,20	93,20	102,10
600	97,4	101,3	71	129,04	98,00	89,70	99,90
610	95,2	100,7	67	136,34	98,50	88,40	99,80
620	93,1	100,3	64	143,62	99,70	88,10	100,70
630	91,0	99,0	60	150,83	101,00	88,00	101,80
640	89,3	100,0	57	157,98	102,20	87,80	102,90
650	87,5	99,9	554	165,03	103,90	88,20	104,90
660	86,0	100,1	52	171,96	105,00	87,90	106,30
670	84,6	99,6	50	178,77	104,90	86,30	106,40
680	83,3	99,5	47	185,43	103,90	84,00	105,70
690	81,4	98,2	45	191,93	101,60	80,20	103,30
700	79,1	96,5	42	198,26	99,10	76,30	100,90

LES SOURCES LUMINEUSES SECONDAIRES

A - ETUDE DE LA FORMATION DE LUMIERES COLOREES PAR TRANSMISSION OU REFLEXION SELECTIVE

La lumière qui parvient à l'œil venant d'un objet quelconque transporte les informations qui, analysées par les récepteurs visuels, sont transformées en stimuli qui donnent lieu aux sensations, plus ou moins colorées, que nous attribuons, improprement, à l'objet lui-même en parlant de sa couleur .

Cette lumière dépend, nécessairement, de la composition de la lumière incidente plus ou moins modifiée par un trajet de longueur variable dans le milieu des objets observés .

B - COLORATION PAR TRANSMISSION

Si ce milieu est transparent, la lumière le traverse en grande partie en subissant un très faible affaiblissement par réflexion et diffusion . La lumière observée parvient à l'œil, directement , après avoir traversé l'objet . Elle est transmise après avoir subi une absorption globale qui est fonction de la transmittance lumineuse du milieu traversé :

$$\tau = \frac{\text{Flux lumineux total émergent}}{\text{Flux lumineux incident}}$$

et une absorption sélective parfois, due à τ_λ qui représente le facteur de transmission .

Une lumière blanche incidente, transmise par un milieu peut donc, suivant le cas être plus ou moins atténuée par absorption générale et colorée par absorption sélective . Là encore, les deux phénomènes existent avec prédominance de l'un ou de l'autre, les couleurs les plus belles étant obtenues lorsque l'absorption sélective prédomine largement avec le minimum d'absorption générale .

C - COLORATION PAR REFLEXION

1°- Réflexion pure .

a) Réflexion métallique - Elle a lieu sur des surfaces métalliques polies suivant les lois habituelles . Le facteur de réflexion est élevé, souvent voisin de 1, mais peut varier en fonction de la longueur d'onde, ce qui donne lieu à une lumière réfléchie colorée à partir d'une lumière blanche incidente : la lumière réfléchie par l'or en jaune, le cuivre en rouge, l'argent en bleu, sur certains alliages or-argent en vert .

C'est ainsi que l'influence de la réflexion des supports métalliques des éléments dentaires de reconstitution a une importance non négligeable sur la teinte résultante des dents de remplacement .

b) Réflexion vitreuse - Lorsque le milieu présente une faible absorption, une grande partie de la lumière peut y être transmise, contrairement à ce qui se passe pour la réflexion métallique .

Le flux réfléchi par rapport au flux incident est alors défini dans le cas des rayons normaux à la surface de séparation par les équations de FRESNEL :

$$\rho = \frac{Fr}{Fi} = \left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2$$

et de façon plus générale :

Lorsque le plan de polarisation est dans le plan d'incidence :

$$\rho = \left[\frac{\sin (i - r)}{\sin (i + r)}\right]^2$$

Lorsqu'il lui est perpendiculaire

$$\rho = \left[\frac{\mathrm{tg} (i - r)}{\mathrm{tg} (i + r)}\right]^2$$

Si nous reprenons la formule de Fresnel correspondant à une incidence normale, il nous est très facile de l'utiliser pour calculer la proportion de lumière qui est réfléchie dans ces conditions à l'interface air émail .

En effet, l'indice de réfraction de l'émail en surface a été évalué en utilisant la méthode Cargille Allen basée, précisément, sur l'application des lois de Fresnel . Pour cela, on l'immerge dans des liquides d'indice variable jusqu'au moment où l'un d'eux ne donne plus lieu à une réflexion normale qui permette de distinguer l'émail du milieu . Ceci a permis de déterminer un indice de 1, 62 en surface .

" n " dans la formule de Fresnel représente le rapport des indices du deuxième milieu sur le premier, c'est-à-dire :

$$n = \frac{1,62}{1}$$

en prenant l'indice de l'air égal à 1 .

donc : $$\frac{n - 1}{n + 1} = \frac{1,62 - 1}{1,62 + 1} = \frac{0,62}{2,62} = 0,236$$

et $$\left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2 = (0,236)^2 = 0,05569$$

$$\rho \# 0,056$$

La quantité lumière tombant normalement sur une surface dentaire qui pénètre dans les toutes premières couches de l'émail , correspond à 94 % environ de la lumière incidente . Elle est ensuite diffusée par les éléments sous-jacents . Cette première diffusion l'enrichit en radiations de courtes longueurs d'onde, puis elle parvient au niveau de la zone dentinaire où le bleu est absorbé préférentiellement ce qui explique les variations de couleurs du collet au bord libre en relation directe avec l'épaisseur et la nature de la couche d'émail recouvrant la dentine .

On voit que la proportion de lumière réfléchie est d'autant plus faible que le rapport des indices de réfraction est plus proche de l'unité, donc plus grande la quantité de lumière transmise .

2°- Réflexion diffuse.

a) En surface :

La lumière diffusée peut être renvoyée dans toutes les directions par les éléments de surface lorsque celle-ci est suffisamment dépolie .

La part de lumière réfléchie directement, par rapport à la lumière réfléchie par diffusion interne, augmente avec le dépoli de surface .

Cette lumière a, le plus souvent, une composition très proche de la lumière incidente . Si celle-ci est blanche, c'est de la lumière blanche qui est diffusée .

b) En profondeur :

Une partie , plus ou moins grande, de lumière, selon le degré de transparence du milieu, pénètre à l'intérieur où elle subit des absorptions diverses et de nombreuses réflexions avant de ressortir suivant des directions quelconques ; la lumière diffusée ayant alors une composition spectrale généralement différente de celle de la lumière incidente .

La lumière est tout d'abord diffusée par les molécules du milieu suivant les lois de la diffusion moléculaire .

Elle l'est, également , par les particules de matières différentes de celles du milieu qui les entoure dont la forme, la dimension, l'indice de réfraction, l'absorption sélective, ont une influence sur sa qualité et sa nature .

La lumière diffusée globale est la résultante de l'ensemble de ces phénomènes .

Dans le cas de l'émail, la diffusion a lieu préférentiellement en profondeur dans un matériau structuré où l'incidence de la lumière provenant d'une seule direction ne donne pas le même résultat qu'un éclairage réparti .

PROTOCOLE D'ETUDE DES TEINTES DES DENTS

La couleur déterminée par le dépouillement des spectres d'analyse spectrale correspond à la couleur isolée suivant les conceptions de NEWTON pour éviter précisément l'influence des contrastes simultanés qui, pour intéressants qu'ils soient dans la théorie de GOETHE et dans le cadre d'une conception globale et philosophique des couleurs, ne ferait qu'ajouter aux difficultés déjà importantes .

Les conditions d'observation sont donc celles des couleurs films après adaptation de l'œil à la lumière ambiante qui sera, suivant le cas, la lumière solaire directe, celle du jour ou celle de l'éclairage à incandescence, c'est-à-dire définie par les étalons B, C ou A des sources lumineuses . Ces conditions d'observation qui correspondent sensiblement à l'observation normale des teintes réduisent les variables et nous amènent à faire le parallèle entre la sensation colorée purement subjective et la répartition spectrale de la lumière qui la produit .

Il est,en effet,séduisant de pouvoir passer de l'analyse spectrale à la sensation colorée correspondante .

On sait que des courbes spectrales différentes peuvent donner lieu à des stimuli identiques, ce qui engendre les ensembles métamères . Par contre, à une courbe spectrale déterminée ne correspond qu'une seule impression colorée .

Pour les objets comme les dents dont la couleur résulte de la réflexion diffuse de la lumière incidente, on peut faire figurer cette sensation colorée dans le triangle chromatique à partir de la courbe de répartition spectrale, en utilisant les coefficients de distribution relatifs à chaque longueur d'onde, en fonction du facteur de réflexion diffuse correspondant .

Les coefficients de distribution varient, évidemment, suivant la nature de la lumière incidente .

Pour chacune des lumières étalons, des tables donnent les coefficients correspondants à chaque tranche de longueur d'onde .

Il est possible, à partir de ces informations, de calculer les coordonnées trichromatiques de l'objet observé sous telle ou telle lumière étalon, et, par conséquent, de le situer dans le triangle chromatique affecté de la valeur de son albédo, pour mieux préciser sa leucie ou sa valeur .

C'est ainsi que nous en sommes arrivé à essayer de déterminer la répartition spectrale des luminances comparées de la magnésie et des dents, de façon à pouvoir établir la courbe des facteurs de réflexion diffuse de ces dernières, en fonction des longueurs d'onde . La magnésie étant un diffuseur presque parfait, le rapport des luminances dents-magnésie pour chaque longueur d'onde, donne le coefficient de réflexion diffuse correspondant .

Mais, auparavant, nous préciserons ce que l'on entend par courbe de visibilité, coefficients de distribution, facteur de luminance, triangle chromatique, pureté au sens purement physiologique .

EFFET PHYSIOLOGIQUE DES RADIATIONS LUMINEUSES

A - RELATION ENTRE LES UNITES ENERGETIQUES ET LUMINEUSES

On appelle brillance énergétique le rapport de la variation de l'intensité énergétique du rayonnement à la section intéressée de ce rayonnement lorsque cette dernière tend vers 0. On désigne donc la brillance énergétique par :

$$\mathcal{B} = \frac{d\,I}{d\,\sigma}$$

Cette expression se rapporte à un volume non défini dont on ne considère que l'énergie rayonnée, figurée par des demi-droites issues de celui-ci .

La radiance énergétique au contraire se rapporte à une source de surface S bien définie, en considérant le flux émis dans l'angle solide 2π . Si l'on fait le rapport de la variation de flux à la variation de la surface lorsque celui-ci tend vers 0, on obtient la valeur de la radiance soit :

$$\mathcal{R} = \frac{d\,\Phi}{d\,S}$$

Ces deux grandeurs sont de nature purement physique et il n'est pas besoin de faire appel à des notions physiologiques pour les définir totalement .

Cependant, elles n'offrent qu'une correspondance toute relative avec les impressions lumineuses auxquelles elles peuvent donner lieu .

En effet, s'il est possible d'exprimer en ultraviolet ou en infrarouge plus ou moins lointain les brillances des sources correspondantes, celles-ci étant invisibles, aucune sensation lumineuse ne peut leur être attachée, d'où le sens très restrictif de brillance dans ces cas .

Par contre, ceci nous permet, très facilement, de passer à la notion de luminance qui représente une valeur physiologique et qui n'est autre que la brillance lumineuse et se déduit de la brillance énergétique par le coefficient de visibilité relative, ce qui justifie le symbole B qui correspond à la luminance :

$$B = Ko \; V_\lambda \; b_\lambda$$

B - DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE VISIBILITE RELATIVE

On a cherché à faire déterminer l'égalité de brillance de deux sources de couleur différente par un ensemble d'observateurs . Les résultats ont été relativement imprécis, la dispersion des mesures donnant lieu à des écarts de l'ordre de 10 % pour un même observateur dans le temps . La précision est augmentée lorsqu'il lui est donné à comparer deux lumières ayant des couleurs très proches l'une de l'autre ; il est alors possible de parvenir à déterminer le moment où l'égalité des brillances est atteinte .

Par approche successive il est donc possible de déterminer le rapport de visibilité des différentes couleurs spectrales, soit, par exemple, deux couleurs de visibilité relative $\frac{V\,1}{V\,2}$ déterminées par l'observateur et deux autres dont la visibilité relative est dans les mêmes conditions $\frac{V\,2}{V\,3}$.

on obtient : $$\frac{V\,1}{V\,3} = \frac{V\,1}{V\,2} \times \frac{V\,2}{V\,3}$$

On peut ainsi parcourir le spectre et définir, par approche successive, les facteurs de visibilité relative par rapport à une longueur d'onde λo prise pour unité et tracer la courbe de visibilité relative en fonction des longueurs d'onde du spectre .

Si l'on fait en sorte que λo soit la longueur d'onde de visibilité la plus grande, la valeur λo correspond à 555 mμ pour laquelle on prend V = 1 (convention de la C. I. E.).

La courbe des visibilités relatives est une courbe sensiblement en cloche, légèrement aplatie du côté des grandes longueurs d'ondes, allant de 460 à 690 mμ.

Bien que dans certaines conditions exceptionnelles il soit possible de voir jusqu'à 300 mμ dans l'U. V. et 900 mμ dans l'infrarouge, on peut cependant limiter le domaine du visible comme allant de 0, 4 μ à 0, 7 μ.

C - PROPRIETES DES LUMINANCES

La courbe des visibilités relatives est obtenue par comparaison des lumières monochromatiques.

Lorsqu'on tient compte du rapport de visibilité relative pour une lumière de longueur d'onde déterminée, on voit que pour un observateur moyen l'aspect de cette lumière ne dépend pas de sa seule brillance énergétique $\mathfrak{B}$, mais du produit $V_\lambda \mathfrak{B}$.

La luminance peut alors s'écrire : $B = Ko\ V_\lambda \mathfrak{B}$

Ko est le coefficient qui correspond au choix des unités prises pour mesurer $\mathfrak{B}$, il est égal au coefficient de visibilité maximum pour lequel $V_\lambda = 1$, c'est-à-dire pour λo soit 555 mμ dans le système C. I. E.

De ce qui précède, découlent les propriétés essentielles de la luminance : transitivité, proportionnalité et additivité.

La loi de transitivité montre que si les luminances sont telles que si B 1 = B 2 et B 2 = B 3, on peut affirmer que B 1 = B 3.

La loi de proportionnalité montre que si les luminances B 1 et B 2 sont égales en multipliant la brillance de chacune par la même valeur, les produits obtenus donnent lieu à la même égalité apparente des brillances, ceci en dehors des conditions scotopiques et photopiques.

La loi d'additivité permet d'écrire que pour une somme de radiations simples et pour un rayonnement continu, la luminance totale est égale à la somme des luminances élémentaires .

$$B = B\,1 + B\,2 + B\,3$$

1°- Loi d'ABNEY .

Lorsque la source considérée donne lieu à une lumière polychromatique, la luminance totale est alors égale à la somme des luminances composantes .

$$B = Ko \int V_\lambda \cdot b_\lambda \cdot d_\lambda$$

$b_\lambda \; d_\lambda$ est la brillance énergétique élémentaire

b_λ représentant la brillance énergétique spectrale totale .

Cette additivité des luminances n'est d'ailleurs pas absolument exacte . Suivant l'étendue du champ observée et les conditions d'observation , certains auteurs, tels que DRESLER puis PIERON , ont pu démontrer qu'on obtenait, par le calcul, un résultat légèrement erroné, à savoir que la lumière résultante présente une luminance plus faible que la somme des composantes lorsque la plage observée est de faible étendue alors que c'est l'effet inverse qui se produit dans le cas de plage de grande étendue .

La notion de luminance ainsi définie est cependant très utile en colorimétrie malgré la complication représentée par l'interprétation visuelle et l'influence de l'environnement sur les sensations enregistrées .

2°- Expression du flux lumineux .

Si l'on observe un rayonnement monochromatique de flux énergétique Φ , l'impression ressentie dépend de la longueur d'onde de cette lumière . La sensation subjective de flux lumineux F qui s'en déduit dépend du facteur de visibilité relative V_λ et du coefficient de visibilité maximum Ko .

Le flux lumineux a, dans ce cas, pour expression :

$$F = Ko \cdot V_\lambda \cdot \Phi$$

Si l'on prend la longueur d'onde correspondant au maximum de la fonction de visibilité relative de la C.I.E., soit 555 mμ pour laquelle $V_\lambda = 1$ et Ko = 663, on obtient une impression lumineuse équivalente à 663 lumens par watt .

L'œil, dans ce cas, évalue deux grandeurs, d'une part la luminance de la plage observée, d'autre part sa couleur qui correspond à une longueur d'onde bien précise .

3°- Relations entre les flux énergétiques et lumineux dans le cas des lumières polychromatiques .

Dans le cas où la lumière est polychromatique, on constate que la luminance de l'ensemble est toujours évaluée mais la décomposition élémentaire de la lumière n'est pas effectuée et l'œil ne transmet qu'une excitation lui rappelant une couleur du spectre plus ou moins pure ou plus ou moins lavée de blanc .

Par conséquent, l'utilisation de trois systèmes récepteurs seulement au niveau de l'œil paraît intervenir dans l'analyse visuelle d'une couleur .

Par exemple :

a) la luminance totale .

b) la couleur correspondant à la longue d'onde dominante .

c) son degré de pureté, c'est-à-dire la proportion de lumière colorée dans la lumière totale .

Le flux lumineux résultant est la somme des flux lumineux élémentaires dF eux-mêmes reliés aux flux énergétiques élémentaires d Φ ce qui s'exprime par :

$$F = Ko \int V_\lambda \, d\Phi$$

4°- Lois de Grassmann.

Dans le cas des lumières polychromatiques la trivariance du système visuel nécessite une analyse plus précise des phénomènes colorés, indépendamment des valeurs lumineuses .

En effet, si l'on procède à l'addition, par superposition par exemple, de deux lumières colorées, on constate que l'œil est incapable d'analyser la couleur résultante et d'en déduire la qualité des lumières composantes .

De ce fait, une même sensation colorée peut être provoquée par des compositions élémentaires différentes . Il y a métamérisme. On peut l'exprimer par l'équation colorimétrique suivante :

$$B\,1 + B\,2 \equiv B\,3 + B\,4$$

ou B 1, B 2 et B 3, B 4 représentent les luminances des lumières donnant lieu par association à des sensations équivalentes .

Cette confusion résulte de l'analyse succincte qu'effectue l'œil sur un ensemble, très complexe, de radiations de nature et d'intensité très variable .

On est également amené à faire une autre constatation à savoir que la lumière résultante est presque toujours moins pure que les lumières composantes . Certaines lumières colorées semblent se neutraliser en donnant lieu à une certaine quantité de lumière blanche.

Dans certains cas particuliers la neutralisation peut être complète et aboutir au blanc . La perception est alors purement lumineuse sans qu'aucune sensation colorée lui soit attachée .

$$B\,1 + B\,2 \equiv B\,w$$

Les lumières qui donnent lieu à ce phénomène dont l'addition aboutit à une résultante purement lumineuse , sont complémentaires . On les retrouve très facilement sur le spectre de part et d'autre des longueurs d'onde 492 et 567 mμ , c'est-à-dire, pratiquement, toutes les couleurs autres que les vertes . Pour ces dernières, la neutralisation ne peut avoir lieu que par des mélanges en proportions convenables des couleurs extrêmes, violet et rouge donnant lieu à toute la gamme des pourpres qui n'existent pas dans les couleurs spectrales

élémentaires et ne correspondent pas à une radiation de longueur d'onde déterminée . On peut cependant les définir par rapport à la longueur d'onde de leur couleur complémentaire qui est un vert .

La neutralisation de la sensation colorée et la production de lumière blanche par un mélange de complémentaires n'a lieu qu'à la condition de respecter des proportions bien définies de chacune d'entre elles, si l'une est en excès, il subsiste une sensation colorée d'autant plus nette que cet excès est plus important .

Si nous reprenons l'équation colorimétrique, nous aurons alors :

$$B\,1 + B\,2 \equiv B\,w + B_\lambda$$

B_λ représentant l'excès de lumière colorée non neutralisée par B 2, ce qui explique la perte de pureté colorimétrique généralement constatée lors du mélange de deux lumières dont la résultante paraît alors lavée de blanc .

On en déduit qu'il est possible de reconstituer une lumière quelconque par un mélange judicieux de lumière blanche et d'une lumière monochromatique convenablement choisie dans les couleurs spectrales ou dans la gamme des pourpres purs produite par mélanges variables des couleurs des extrémités du spectre le rouge et le violet .

$$B\,1 + B\,2 \equiv B\,w + B_\lambda$$

Ce qui revient à définir une couleur par la luminance de la lumière blanche qu'elle contient, celle de la lumière colorée et la longueur d'onde de cette dernière .

- 5°- Facteur de pureté d'une lumière.

Par conséquent, si une lumière ne donne pas lieu du fait de sa composition à la formation d'une certaine proportion de lumière blanche, autrement dit si sa luminance totale est due uniquement à la lumière colorée, la lumière est pure et saturée .

$$B = B_\lambda$$

puisque $Bw = 0$, c'est le cas des couleurs pures du spectre .

Dans le cas le plus général, une part de la luminance totale revient à une certaine proportion de lumière blanche, Bw n'est plus nul, la lumière est de moins en moins saturée et de moins en moins pure .

Enfin, lorsque toute luminance due à la fraction colorée a disparu, la lumière est devenue totalement blanche .

Le rapport de la luminance de la longueur d'onde dominante à la luminance totale est, par conséquent, hautement significatif de la pureté de la couleur . Le facteur de pureté $p = \frac{B\lambda}{B}$ exprime bien cette constatation .

La lumière colorée peut, dès lors, être définie par sa luminance totale "B", sa longueur d'onde dominante "λ " et son facteur de pureté "p" .

6°- Définition conventionnelle de la lumière blanche .

Le repérage d'une lumière colorée par sa luminance totale, sa longueur d'onde dominante et son facteur de pureté, n'est valable que dans la mesure où la lumière blanche de référence est elle-même bien définie . Pour plus de commodité on se réfère, le plus souvent à une lumière blanche, conventionnelle, dite d'égale énergie ou E_λ est constant dans tout le spectre et égal à l'unité .

CONVENTION DE LA SYNTHESE TRICHROME

Les équations colorimétriques métamériques expriment le fait qu'une même couleur peut être obtenue d'une infinité de façon par des mélanges de radiations lumineuses de nature bien différente .

On peut reproduire une lumière colorée par mélange dans une certaine proportion de deux lumières différentes, de telle sorte que la luminance totale obtenue soit égale à la luminance de la lumière à reproduire et que le mélange laisse apparaître la couleur dominante avec le même degré de pureté . Il sera, cependant, difficile avec deux couleurs seulement de parvenir à des valeurs proches de la pureté maxima dans un certain nombre de cas .

A - REPRODUCTION A PARTIR DE TROIS LUMIERES COLOREES

Si l'on utilise maintenant trois radiations monochromatiques, convenablement choisies, on peut reproduire presque toutes les lumières colorées possibles en s'approchant de très près de la pureté maxima .

Les trois radiations choisies sont appelées fondamentales et l'on peut caractériser un mélange d'un certain pourcentage de chacune des fondamentales aboutissant à une lumière de coloration déterminée par les proportions de chacune d'entre elles exprimées au moyen d'unités arbitrairement choisies . On obtient ainsi les composantes trichromatiques de cette lumière .

La résultante colorimétrique étant égale à la somme des composantes trichromatiques .

Si l'on porte sur un système d'axes de coordonnées tridimensionnel la valeur des composantes trichromatiques de différentes lumières, on voit que tous les points correspondants à une même valeur de la résultante colorimétrique se trouvent situés sur un même plan .

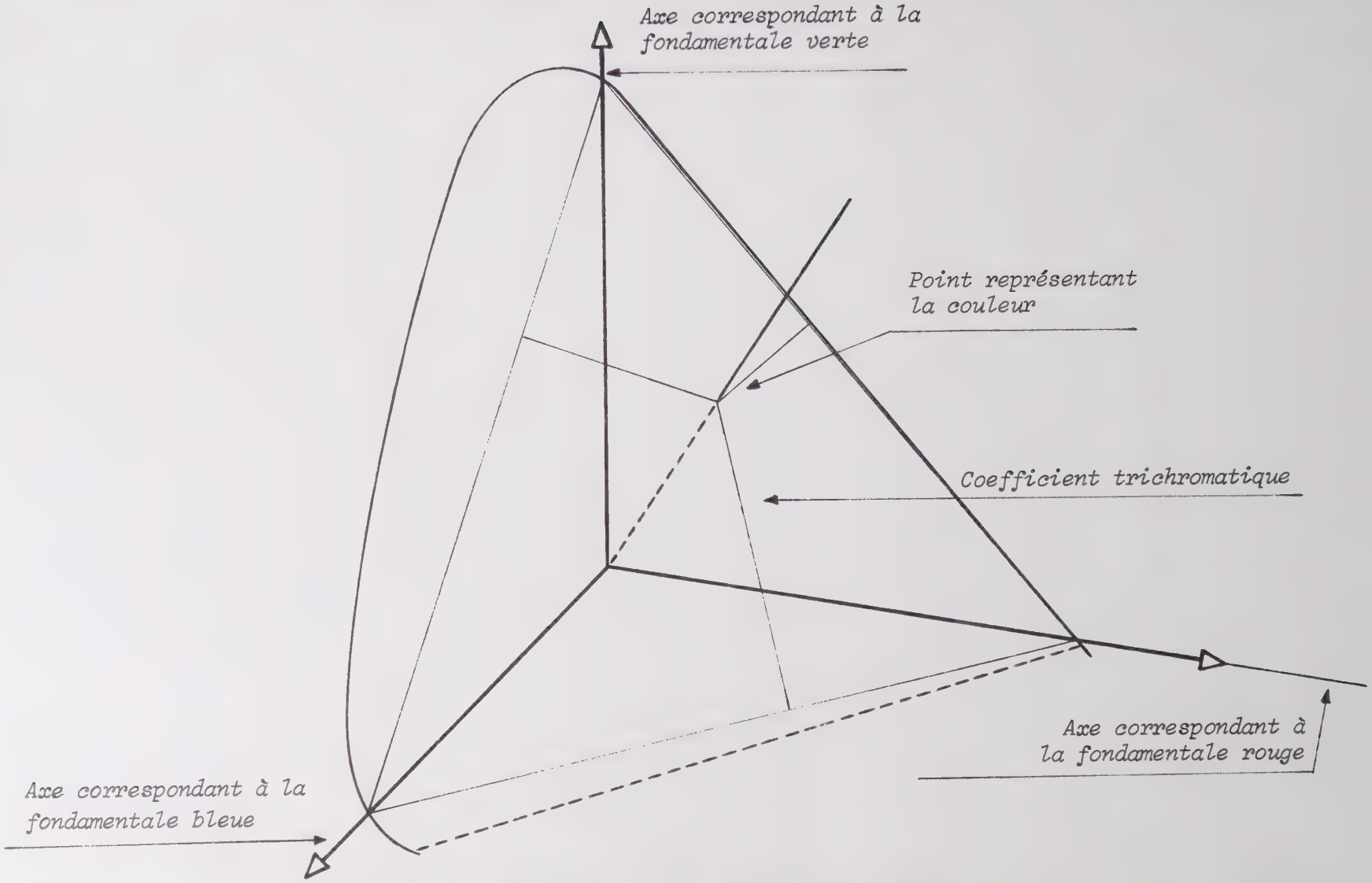
Chacun de ces plans coupe les plans des coordonnées suivant les bases d'un triangle équilatéral et par conséquent on trouve autant de triangles semblables qu'il y a de résultantes possibles, c'est-à-dire un nombre infini . Les points homologues situés à l'intérieur de chacun d'eux correspondent à des réactions chromatiques sensiblement identiques, seule change la sensation lumineuse totale ressentie .

La loi de proportionnalité s'applique également ici et si l'on multiplie par un certain facteur la brillance énergétique d'une lumière déterminée on obtient l'égalité en multipliant par le même facteur chacune des composantes trichromatiques de cette lumière .

De ce fait, on voit qu'il est possible de séparer les informations relatives à la couleur de celles relatives à la brillance, cette dernière permettant d'égaliser les lumières de même composition colorée par une égalisation des brillances en multipliant chacune des composantes chromatiques par le même facteur .

Il est évident que dans ces conditions une lumière comprenant les mêmes composantes trichromatiques pourra avoir des brillances résultantes différentes suivant le facteur de multiplication des composantes .

Mais il subsiste, dans ce cas, le même rapport entre les composantes donnant lieu à la même sensation chromatique et les coordonnées du point représentatif dans le plan de l'un des triangles . Il est possible de choisir le triangle dont la somme des coordonnées d'un point soit égale à un et l'on voit s'établir ainsi une relation directe entre les coordonnées et les trois composantes , d'où le nom de coordonnées trichromatiques qui leur est donné .



Triangle équilatéral comprenant toutes les couleurs de même résultante, coefficients trichromatiques de l'une d'entre elles et représentation du lieu spectral

B - DEFINITION DU FLUX CHROMATIQUE

Pour parvenir à la détermination d'une couleur au moyen de trois fondamentales, on mélange des proportions convenables de chacune d'entre elles pour obtenir l'égalisation .

Le choix des unités permettant d'évaluer la quantité de lumière emise en œuvre est entièrement conventionnel . Pour chaque fondamentale l'unité correspond à la quantité de lumière qui, mélangée à une unité de chacune des deux autres donne une lumière blanche déterminée .

On peut donc formuler de multiples façons dont la plus simple est l'ouverture d'une fente . Mais une fois celle-ci précisée, l'unité correspondant à la fondamentale est parfaitement définie et l'on peut l'exprimer par exemple par le flux énergétique correspondant φ.

A l'égalisation on aura une composante dont la valeur sera exprimée en unité lumineuse conventionnelle et dont le flux énergétique sera φ .

Soit, par exemple, la composante bleue, sa luminance sera calculée à partir de son flux énergétique .

$$F_B = K_o \; V_o \; \Phi_B$$

La luminance de l'unité correspondante de la fondamentale sera calculée de même à partir de son flux énergétique .

$$L_B = K_o \; V_o \; \varphi_B$$

et l'on peut formuler le flux chromatique Γ_B de la correspondante bleue en utilisant soit les unités énergétiques, soit les unités lumineuses .

$$\Gamma_B = \frac{F_B}{L_B} = \frac{\Phi_B}{\varphi_B}$$

Le flux chromatique total de la lumière d'égalisation est donc :

$$\Gamma_S = \Gamma_B + \Gamma_V + \Gamma_R$$

suivant la loi d'ABNEY

$$F_S = F_B + F_V + F_R$$

d'autre part, le flux chromatique d'une source peut s'écrire :

$$\Gamma_S = \frac{F_S}{L_S}$$

ce qui donne en tenant compte de

$$F_S = L_S \times \Gamma_S \quad \text{et} \quad F_S = F_B + F_V + F_R$$

$$L_S \cdot \Gamma_S = L_B \cdot \Gamma_B + L_V \cdot \Gamma_V + L_R \cdot \Gamma_R$$

d'où $$L_S = L_B \cdot \frac{\Gamma_B}{\Gamma_S} + L_v \cdot \frac{\Gamma_v}{\Gamma_S} + L_R \cdot \frac{\Gamma_R}{\Gamma_S}$$

Ayant remarqué précédemment que les composantes trichromatiques d'une même couleur étaient proportionnelles entre elles indépendamment de la brillance totale, on peut les représenter dans un plan en choisissant , par exemple, trois nombres γ proportionnels aux flux chromatiques et tels que leur somme soit égale à l'unité .

$$\gamma_b + \gamma_v + \gamma_r = 1$$

ce qui donne :

$$\frac{\gamma_b}{\Gamma_B} = \frac{\gamma_v}{\Gamma_V} = \frac{\gamma_r}{\Gamma_R} = \frac{1}{\Gamma_B + \Gamma_V + \Gamma_R} = \frac{1}{\Gamma_S}$$

γ_b γ_v γ_r sont alors les coordonnées trichromatiques de la lumière étudiée .

De cette dernière expression , on peut tirer

$$\frac{\gamma_b}{\Gamma_B} = \frac{1}{\Gamma_S} \longrightarrow \gamma_b = \frac{\Gamma_B}{\Gamma_S}$$

ce qui nous donne en remplaçant $\frac{\Gamma_B}{\Gamma_S}$ par γ_b dans l'expression de la sommes des unités lumineuses :

$$L_S = L_B \cdot \gamma_b + L_y \cdot \gamma_v + L_R \cdot \gamma_r$$

Ces expressions sont les relations fondamentales de la colorimétrie appliquée .

C - GENERALISATION DE LA SYNTHESE TRICHROME

On peut faire en dorte que deux des trois fondamentales donnent lieu par mélange à une résultante qui soit exactement la complémentaire de la troisième fondamentale, le mélange total aboutissant alors à la production de lumière blanche . Suivant que les deux fondamentales initiales sont plus ou moins écartées elles-mêmes que des complémentaires, on peut l'exprimer par les deux équations :

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 = \Gamma_W$$

et $$\Gamma_1 - \Gamma_2 + \Gamma_3 = \Gamma_w$$

ou plus généralement $\Gamma_1 + \Gamma_2 \; \Gamma_3 = \Gamma_W$ en sous-entendant que l'un des flux composant puisse prendre des valeurs négatives .

On peut ainsi démontrer qu'une lumière monochromatique quelconque peut être reproduite par une addition algébrique de trois flux convenables des fondamentales

$$\Gamma_\lambda = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$$

Par extension, une lumière provenant d'une source quelconque S étant composée d'un ensemble de radiations monochromatiques λs en faisant la somme des équations colorimétriques correspondant à ces radiations, on parvient à l'équation générale de la synthèse trichrome :

$$\Gamma_S = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$$

Etant entendu que l'expression est purement algébrique et que les flux chromatiques Γ peuvent prendre des valeurs négatives .

D - EVOLUTION DE LA SYNTHESE TRICHROME

1°- Représentation de MAXWELL

Dès lors, il nous est possible de représenter des lumières quelconques produites par les différents mélanges des fondamentales au moyen d'une expression graphique .

Dans un triangle équilatéral la somme des projections d'un point situé à l'intérieur du triangle sur chacun des côtés est égale à la hauteur h. Nous pouvons faire :

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1 = h$$

Les fondamentales sont alors placées au sommet du triangle et chacune des projections représente la valeur du coefficient correspondant à la fondamentale située sur l'angle opposé .

Si nous prenons deux des fondamentales près de l'extrémité du spectre, une rouge et l'autre bleue, d'après ce qui précède, il

nous faut en prendre une troisième, verte, pour que la composition des trois permette de reproduire la lumière blanche d'où la désignation des trois fondamentales choisies pour parvenir à ce résultat par les lettres R (red) G (green) B (blue) .

Si l'on reprend la représentation graphique précédente, on voit que l'aire du triangle représente toutes les lumières susceptibles d'être obtenues par le mélange des trois fondamentales RGB, que l'on a choisi assez éloignées dans l'échelle des couleurs spectrales pour pouvoir reproduire le plus grand nombre de couleurs possibles par leur mélange . Cette représentation qui est celle qu'utilisa MAXWELL , présente l'inconvénient d'une lecture plus compliquée que celle d'un diagramme rectangulaire .

2°- Système R.G.B. à coordonnées rectangulaires.

C'est la raison pour laquelle on a utilisé le triangle rectangle isocèle dont les deux côtés de l'angle droit sont égaux à l'unité .

Dans ce cas, on a R en abscisse, G en ordonnées, B se déduisant des deux précédentes par : $B = 1 - (R + G)$.

Dans le triangle chromatique rectangulaire ainsi défini, il devrait être possible de situer une lumière colorée quelconque et, en particulier, de mettre en place l'ensemble des couleurs spectrales . On constate, tout de suite, qu'il est impossible d'égaliser ces dernières à partir des trois fondamentales choisies .

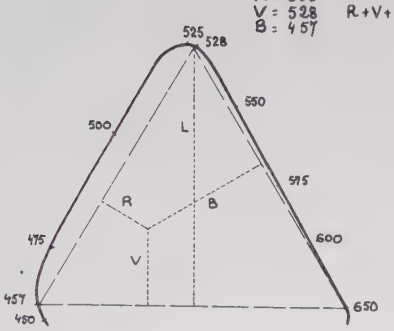
Si l'on éclaire une plage avec la lumière monochromatique spectrale et la plage de comparaison avec le mélange des trois primaires, on constate qu'il est impossible de parvenir à l'égalisation . Celle-ci est obtenue en déplaçant l'une des fondamentales de façon à la surajouter à la lumière monochromatique étudiée que l'on désature par cette opération .

De ce fait, cette fondamentale prend un caractère négatif dans l'équation colorimétrique et les points correspondant à l'ensemble des radiations monochromatiques du spectre se trouvent situés à l'extérieur du triangle chromatique et passent par les sommets du triangle pour les lumières correspondant aux primaires qui ont été choisies .

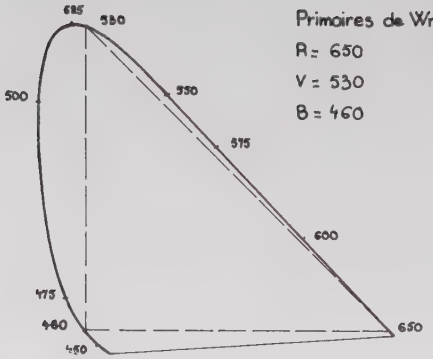
primaires de Maxwell

R = 650
V = 528
B = 457

R+V+B = L



Triangle de Maxwell suivant le système équilatéral

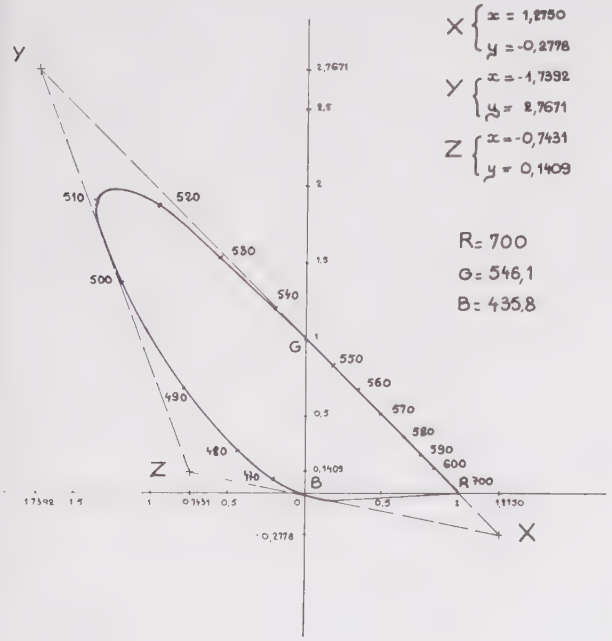


Primaires de Wright

R = 650
V = 530
B = 460

Diagramme de Wright suivant le système rectangulaire

Situation des primaires irréelles du S.I par rapport au Diagramme RGB

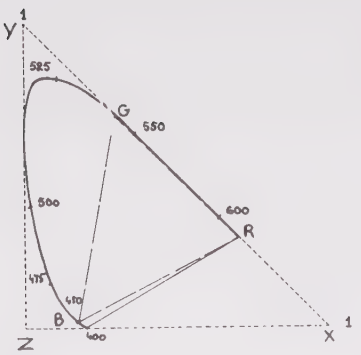


$X \begin{cases} x = 1,2750 \\ y = -0,2778 \end{cases}$

$Y \begin{cases} x = -1,7392 \\ y = 2,7671 \end{cases}$

$Z \begin{cases} x = -0,7431 \\ y = 0,1409 \end{cases}$

R = 700
G = 546,1
B = 435,8



Situation des primaires irréelles par rapport au triangle RGB
Transformation en triangle rectangle dans le S.I.

L'ensemble des lumières colorées, qu'il est possible de reproduire à partir des primaires ainsi définies, se trouve, dès lors, compris dans la surface du triangle . Le lieu spectral est alors extérieur et limité, vers le bas, par la droite qui joint ses extrémités rouge et violette ou droite des pourpres . De plus, on détermine les unités lumineuses des primaires de telle sorte que la lumière blanche W se trouve située au centre du triangle .

Pour parvenir à placer le lieu spectral à l'intérieur du triangle chromatique, il faut créer des fondamentales irréelles auxquelles on parvient par le calcul permettant de réaliser la transformation. C'est ce qui a été fait par la commission internationale de l'éclairage, C.I.E. qui a défini le triangle du système international X Y Z .

Les lettres X Y Z ont été choisies précisément pour bien souligner le caractère irréel des stimuli des primaires qu'elles représentent .

3°- Système international X Y Z .

La C.I.E. a précisé un certain nombre de conventions qui permettent de définir complètement son système .

a) Tout d'abord les stimuli des primaires qui permettent d'inclure le lieu spectral dans le triangle chromatique sont irréelles .

b) L'une des trois fonctions X Y Z qui déterminent le spectre d'égale énergie coïncide avec la courbe de visibilité de l'œil normal , on a choisi Y .

c) Ensuite, définissant par le calcul le lieu correspondant à une unité lumineuse nulle ou alychne , on fait en sorte que les points correspondants aux primaires X et Z soient situés sur l'alychne et que par conséquent les unités lumineuses de ces primaires deviennent: Lx = Lz = O , Ly se confondant avec le flux lumineux = 1 lumen .

d) Enfin, on place le point W correspondant à la lumière blanche de référence au centre du triangle . La lumière W étant également conventionnelle et correspondant à un spectre continu d'égale énergie .

Ce système est encore imparfait mais il est l'aboutissement de l'ensemble des recherches colorimétriques effectuées dans le but

de parvenir à une représentation pratique des lumières colorées . Il n'est utilisable que dans des conditions d'observation moyennes en vision photopique, après définition de la courbe moyenne de visibilité de l'œil dit normal .

Il ne tient pas compte d'effets secondaires comme le contraste simultané et correspond à la vision de couleurs films indépendante après adaptation . Il est, cependant, convenable pour définir avec suffisamment de précision les lumières colorées dans des conditions courantes d'observation et présente, de ce fait, un intérêt pratique indiscutable .

Notre but n'étant pas ici d'étudier les couleurs sous l'angle philosophique, mais simplement de pouvoir procéder à leur comparaison et à leur reproduction, le système international nous procure un moyen relativement correct d'expression .

Tableau V

Coordonnées du lieu spectral dans le système X Y Z

Longueur d'onde	X	Y	Z
380	0,1741	0,0050	0,8209
400	0,1733	0,0048	0,8219
420	0,1714	0,0051	0,8235
450	0,1566	0,0177	0,8257
465	0,1355	0,0399	0,8246
470	0,1241	0,0578	0,8181
475	0,1096	0,0868	0,8036
480	0,0913	0,1327	0,7760
485	0,0687	0,2007	0,7306
490	0,0454	0,2950	0,6596
495	0,0235	0,4127	0,5638
500	0,0082	0,5384	0,4534
505	0,0039	0,6548	0,3413
510	0,0139	0,7502	0,2359
515	0,0389	0,8120	0,1991
520	0,0743	0,8338	0,0919
525	0,1142	0,8262	0,0596
530	0,1547	0,8059	0,0394
535	0,1929	0,7816	0,0255
540	0,2296	0,7543	0,0161
545	0,2658	0,7243	0,0099
550	0,3016	0,6923	0,0061
555	0,3373	0,6589	0,0038
560	0,3731	0,6245	0,0024
570	0,4441	0,5547	0,0012
580	0,5125	0,4866	0,0008
590	0,5752	0,4241	0,0006
600	0,6270	0,3725	0,0004
610	0,6558	0,3339	0,0002
620	0,6915	0,3083	0,0001
635	0,7140	0,2859	0,0001
780	0,7347	0,2653	0,0000

REPRESENTATION DES COULEURS DANS LE TRIANGLE X Y Z

Une couleur se trouve donc représentée par un point de coordonnées x et y correspondantes, la troisième coordonnée étant déduite de :

$$1 - x + y = z$$

La lumière blanche de référence W est représentée par le point achromatique situé au centre du triangle et de coordonnées $x = y = z = 0,333$.

Les lumières du spectre se trouvent distribuées tout au long du lieu spectral qui représente les lumières pures et saturées .

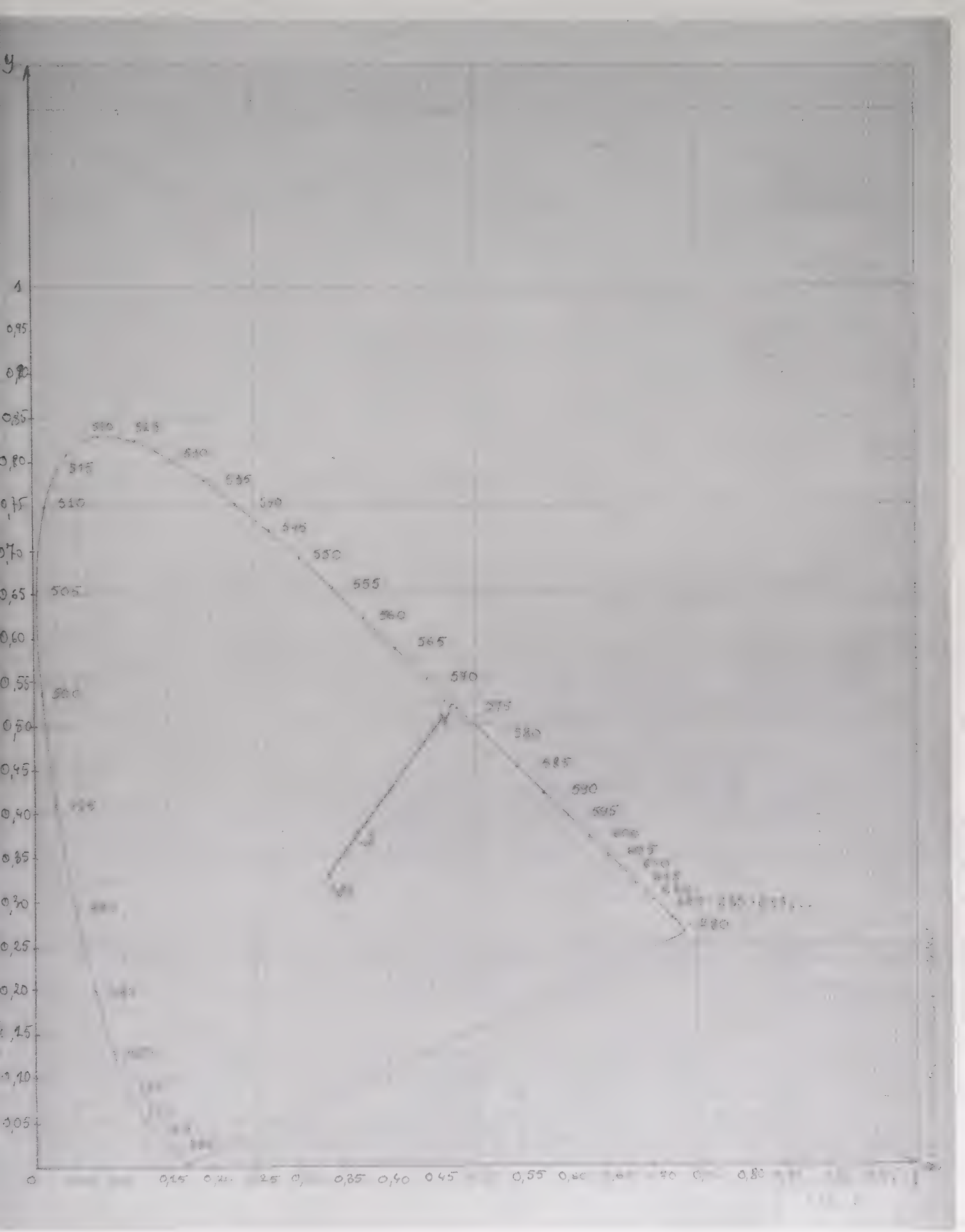
Sur les demi-droites qui vont du point W à chacune des lumières du lieu spectral, se trouvent toutes les lumières colorées de même dominante dont la pureté varie de 0 à 1 .

Le segment qui joint l'extrémité violette du lieu spectral à l'extrémité rouge est la droite des pourpres .

Si l'on trace la droite qui va d'un point du lieu spectral ou de la droite des pourpres au point W et la prolonge jusqu'à sa rencontre avec le lieu spectral ou la droite des pourpres du côté opposé, le point d'intersection correspond à la complémentaire de la lumière représentée par le point de départ .

En fonction de la règle des centres de gravité qui établit que deux lumières peuvent se composer pour donner lieu à une lumière résultante dont les coordonnées se trouvent situées sur le segment de droite qui joint les deux lumières composantes et le partagent proportionnellement à leur flux chromatique; un point J placé sur W Y représente une lumière dont la dominante est Y mais de pureté plus faible

$$\frac{J\,W}{J\,Y} = \frac{\Gamma\,Y}{\Gamma\,W}$$


y
1
0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
0,70
0,65
0,60
0,55
0,50
0,45
0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
0,15
0,40
0,45
0,55
0,80
510
515
520
525
530
535
540
545
550
555
560
565
570
575
580
585
590
595
505

Le segment J Y représente donc la quantité relative de lumière blanche qui diminue la pureté de la lumière Y pour obtenir la lumière J .

Le rapport $\frac{W\ J}{W\ Y}$ représente la pureté d'excitation p_e

et non pas la pureté colorimétrique p qui est, comme on l'a vu, le rapport des luminances .

$$= \frac{\text{Flux lumineux monochromatique}}{\text{Flux lumineux total}} = \frac{B_J}{B} = \frac{y_\lambda}{y}$$

On ne lit donc pas directement sur le diagramme la pureté colorimétrique, mais la pureté d'excitation . On peut, cependant, la déduire de cette dernière par le calcul .

Le diagramme colorimétrique permet donc, non seulement de situer par ses coordonnées une lumière quelconque, mais celle-ci, une fois déterminée, de préciser la longueur d'onde dominante de cette lumière et indirectement son facteur de pureté après avoir défini la lumière blanche de référence .

La règle des centres de gravité permet également de se livrer à toute opération graphique à partir des lumières colorées de coordonnées déterminées pour en définir la résultante en fonction des proportions respectives de chacune d'entre elles .

RELATION ENTRE LA PURETE COLORIMETRIQUE ET LA PURETE D'EXCITATION

Une couleur quelconque est donc définie par ses coordonnées x et y . Or, la représentation d'une lumière colorée par sa longueur d'onde dominante λ et son facteur de pureté p est beaucoup plus expressive, puisqu'elle permet d'emblée d'imaginer sa couleur de base et son degré de saturation . Elle est d'autant plus vive et pure qu'elle est plus proche de la saturation et d'autant plus pastel et lavée de blanc qu'elle se rapproche de W. Malheureusement, le facteur de

pureté $\frac{y_\lambda}{y}$ n'est pas explicitement donné par le rapport des segments ainsi déterminés ; celui-ci est appelé pureté d'excitation p_e pour le différencier du facteur de pureté p ou pureté colorimétrique.

On a pour relation : $p = \frac{y_\lambda}{y} \cdot p_e$

Il suffit, dès lors, de tracer la droite reliant le point correspondant à la lumière blanche à celui correspondant à la couleur, déterminée par ses coordonnées, pour obtenir, sur le lieu spectral , la longueur d'onde dominante, tandis que les segments correspondants donnent la pureté d'excitation, cette dernière permettant de déterminer la pureté colorimétrique .

Si l'on prolonge la droite jusqu'à sa rencontre en un deuxième point du lieu spectral ou de la droite des pourpres, on obtient la longueur d'onde complémentaire dont le mélange avec la lumière colorée, dans les proportions données par la règle des centres de gravité, doit donner la lumière blanche de référence .

A - LES COEFFICIENTS DE DISTRIBUTION

La détermination du point correspondant à une couleur dans le triangle chromatique international peut être effectuée, soit en utilisant une méthode colorimétrique faisant appel à la trivariance visuelle soit en interprétant la distribution spectrale de la lumière étudiée de façon purement instrumentale .

C'est dans ce dernier cas que peuvent être utilisés les coefficients de distribution .

Une source lumineuse peut être caractérisée par la répartition énergétique du rayonnement tout au long de l'échelle des longueurs d'ondes . On peut calculer pour chacune d'elles composant le spectre les coefficients de distribution, c'est-à-dire la proportion de chacune des fondamentales rouge, verte et bleue dont le mélange donne lieu à un stimuli analogue à celui que produit la radiation considérée, que l'on désignera par $\bar{x}$ $\bar{y}$ $\bar{z}$, ou de façon plus générale par $\bar{\gamma}$.

En vertu de la loi d'additivité, la somme de chacune de ces séries de coefficient de distribution compte tenu de la répartition énergétique des radiations dans le spectre obtenu, permet de calculer les coordonnées chromatiques correspondant à la lumière étudiée et par conséquent sa position dans un triangle de couleur déterminé .

Une source de répartition spectrale E_λ peut donc être repérée colorimétriquement dans le système C.I.E. par ses trois flux chromatiques X, Y, Z, par sommation des coefficients de distribution $\bar{x}\ \bar{y}\ \bar{z}$ de chacune des radiations élémentaires qui le composent :

$$X = \sum \alpha\ \bar{x}\ E_\lambda\ \Delta_\lambda$$

$$Y = \sum \alpha\ \bar{y}\ E_\lambda\ \Delta_\lambda$$

$$Z = \sum \alpha\ \bar{z}\ E_\lambda\ \Delta_\lambda$$

α est un coefficient qui dépend du sens physique de E_λ (flux énergétique, brillance spectrale ou autre valeur conventionnelle de mesure) . Δ_λ correspond à un intervalle de longueur d'onde très petit assimilable à une radiation élémentaire .

B - UTILISATION DES ORDONNEES SELECTIONNEES

Le calcul des coordonnées trichromatiques par la sommation des coefficients de distribution en fonction de la répartition énergétique tout au long du spectre oblige à diviser ce dernier en autant de fragments de valeur Δ_λ par exemple de 5 en 5 mμ ou de 10 en 10 mμ Il faut ensuite calculer pour chacun de ces intervalles la valeur de $\alpha\ \bar{y}\ E_\lambda$ correspondant au milieu de l'intervalle choisi, multiplier cette valeur par le Δ_λ choisi, puis d'effectuer la somme de tous les résultats trouvés avant d'obtenir la valeur du stimulus correspondant . Trois opérations de ce genre sont nécessaires avant de parvenir à la détermination des trois stimuli cherchés .

On préfère simplifier le calcul en divisant le spectre en fragments de largeur inégale, tels que :

$$\alpha\ \bar{y}\ \Delta_\lambda = K$$

la valeur choisie pour $\bar{y}$ se trouvant, comme précédemment, au milieu de l'intervalle ainsi déterminé .

Pour obtenir chacun des stimuli il suffira alors de faire la somme des valeurs correspondant aux longueurs d'ondes sélectionnées.

Pour des spectres dont E varie lentement, on utilise , généralement , 30 ordonnées que l'on peut réduire à 10 suivant la précision recherchée .

Pour des spectres variant rapidement, on peut diviser les régions à forte variation en nouveaux intervalles .

COLORIMETRIE DES LUMIERES DIFFUSEES

Elle correspond à l'essentiel de nos préoccupations .

La surface d'un objet éclairé par une lumière monochromatique présente, généralement, une luminance plus faible que celle de la lumière incidente . Le rapport entre les luminances permet de définir le facteur de réflexion diffuse :

$$\rho_\lambda = \frac{B_{d\lambda}}{B_{i\lambda}}$$

Ce facteur est très proche de 1 dans le cas de surfaces diffusantes presque idéales . Il tend vers 0 lorsque la surface est très absorbante pour la radiation utilisée .

Si l'on utilise des lumières monochromatiques différentes, on obtient pour chacune d'elles le facteur de réflexion diffuse correspondant . Dans le cas de lumières polychromatiques, deux cas peuvent se présenter :

1°- Le facteur de réflexion diffuse reste constant quelle que soit la longueur d'onde, la lumière diffusée a une composition spectrale analogue à celle de la lumière incidente . Si celle-ci est blanche, l'objet apparaît alors comme blanc lorsque le facteur est proche de 1 et de plus en plus gris, pour tendre vers le noir, lorsque le facteur tend vers 0.

2°- Le facteur varie avec la longueur d'onde, la lumière diffusée a une composition différente de celle de la lumière incidente et par conséquent une couleur différente de celle-ci . En particulier, si on utilise une lumière blanche, la lumière diffusée sera colorée, c'est ainsi que l'on est tenté d'attribuer cette couleur à l'objet lui-même .

Parallèlement au facteur de réflexion diffuse correspondant à des radiations de longueur d'onde bien déterminées, on définit, d'une façon plus large, l'albedo ou réflectance, comme le rapport de la luminance totale de la lumière diffusée à la luminance totale de la lumière incidente :

$$\rho = \frac{B_d}{B_i}$$

A - DETERMINATION DE LA COULEUR DE LA LUMIERE DIFFUSEE

On peut opérer par comparaison directe de la lumière diffusée par l'objet avec une lumière synthétique et en tirer les valeurs des stimuli trichromatiques correspondants .

On peut également, retrouver ces stimuli par le calcul à partir de la répartition spectrale de la lumière incidente en utilisant les coefficients de distribution .

Dans ce cas, chaque radiation incidente étant affaiblie en fonction du facteur de réflexion diffuse qui lui est propre, les stimuli correspondants au triangle C.I.E. , par exemple, deviendront :

$$X_d = \sum \alpha \bar{x} E_\lambda \rho_\lambda \Delta_\lambda$$
$$Y_d = \sum \alpha \bar{y} E_\lambda \rho_\lambda \Delta_\lambda$$
$$Z_d = \sum \alpha \bar{z} E_\lambda \rho_\lambda \Delta_\lambda$$

Ces expressions permettent de passer, d'une manière relativement facile mais laborieuse, de la répartition spectrale de la lumière incidente aux valeurs des stimuli trichromatiques en utilisant les facteurs de réflexion diffuse dont il faut préalablement établir , également la répartition dans le spectre .

B - DETERMINATION DE LA REFLECTANCE LUMINEUSE

Pour déterminer l'albédo ou la réflectance de la surface étudiée, on peut de même procéder à une mesure directe par comparaison ou encore utiliser les coefficients de distribution .

Le flux chromatique Y étant proportionnel à la luminance suivant les conditions de la C. I. E., X et Z se trouvant sur l'alychne le facteur de luminance n'étant qu'un rapport, on peut écrire

$$\rho = \frac{\sum \bar{y} E_\lambda \rho_\lambda \Delta_\lambda}{\sum \bar{y} E_\lambda \Delta_\lambda}$$

qui exprime le rapport de la luminance de la surface considérée à celle de la lumière incidente, telle qu'elle apparaîtrait sur un diffuseur parfait .

C - INFLUENCE DE LA REFLECTANCE LUMINEUSE SUR L'ATTRIBUT PSYCHOLOGIQUE DE COULEUR

Lorsqu'un ensemble est éclairé par une lumière quelconque, l'intensité de cette dernière peut varier dans d'assez grandes proportions sans qu'il en résulte une perception de différence bien définie . En effet, l'œil s'adapte aux différents niveaux d'éclairement et les stimuli peuvent être les mêmes après accoutumance pour des lumières d'intensité différente .

Par contre, ce qui est nettement perçu, c'est la quantité de lumière diffusée par chaque objet en fonction de la lumière incidente.

Ce qui importe donc , c'est moins le niveau moyen d'éclairement que les différences de réflectances des surfaces diffusantes .

Les différences de réflectance donnant lieu à des stimuli différents, ces derniers ne suivent pas une progression équivalente. Ils suivent , en effet, une progression logarithmique en raison de la loi de FECHNER .

Si l'on désigne la sensation par V, correspondant à l'impression subjective de la valeur de MUNSELL, on voit que la progression des valeurs varie, sensiblement, comme le logarithme de l'excitation qui les produit, c'est-à-dire de la réflectance lumineuse .

Que ce soit l'expression de FECHNER $V = a \log (1 + b\rho)$

ou celle de PLATEAU $V = a\, \rho^b$

les courbes obtenues sont suffisamment proches les unes des autres, pour que la figure précédente représente l'essentiel du phénomène .

La réflectance est donc analysée sous forme de sensation, donnant une impression de variation de la valeur . Ce sont ces différentes valeurs qui entrent dans notre jugement sur la couleur de la lumière diffusée . On les désigne, également, par convention, sous le nom de leucies . C'est ainsi qu'une surface de facteur de réflexion diffuse ρ_λ constant dans tout le spectre visible et supérieur à 80 % apparaît comme très blanche, quelle que soit l'intensité de la lumière qui l'éclaire. Elle devient de plus en plus grise au fur et à mesure que sa leucie diminue jusqu'à devenir noire pour une réflectance lumineuse proche de 0.

Yves Le GRAND affirme que si le coefficient de réflexion diffuse ρ_λ varie fortement, la surface est colorée .

Pour une longueur d'onde dominante de 572 mμ et une pureté d'excitation de 85 %, le stimulus correspondant est jaune pour une leucie proche de 10 et marron pour une leucie de 3 à 3, 5 . De même, une surface colorée de 515 mμ et de pureté 45 % qui est naturellement verte pour des leucies proches de 10, devient couleur olive pour des valeurs beaucoup plus faibles .

Ceci justifie la notation de réflectance à côté des coordonnées chromatiques dans la définition d'une couleur .

Selon Mac ADAM, des objets apparaissent presque blancs en lumière C lorsque leur longueur d'onde dominante est voisine de 575 mμ avec une pureté d'excitation voisine de 10 % .

Des puretés comprises entre 5 et 10 % permettent encore de les différencier . Lorsque la pureté est inférieure à 3 %, ils sont beaucoup mieux caractérisés par leur leucie, c'est-à-dire leur réflectance que par leur pureté .

Les teintes dont les valeurs sont abaissées par incorporation d'une quantité plus ou moins grande de pigments noir, par exemple, sont dites rabattues . Ce sont toutes les couleurs foncées, en particulier les différentes terres dont la couleur est proche du marron pour la terre de sienne et atteint presque le noir pour la terre d'ombre . Les bleus et les rouges étant des couleurs ayant déjà de faibles propriétés lumineuses, sont très vite rabattus et se confondent alors avec le noir .

Pour nos dents, il est certain et les courbes obtenues le montrent bien, que la leucie joue un rôle très important . En effet, si les variations du facteur de réflexion diffuse en fonction de la longueur d'onde sont faibles, par contre, la valeur moyenne de ces coefficients varie très nettement d'une dent à l'autre .

Ce qui apparaît le plus évident, c'est avant l'absorption sélective dans le bleu, les différences de réflectance des différentes dents et par conséquent la notion de blancheur qui y est associée .

COLORIMETRIE VISUELLE PAR COMPARAISON

La colorimétrie visuelle a permis de définir les unités indispensables à la mesure des couleurs, unités lumineuses, unités colorimétriques, détermination de la courbe de visibilité, équivalence énergétique de la lumière, œil moyen de la C.I.E., etc ...

Les cellules photoélectriques à couche d'arrêt ou photoémissives en surajoutant leurs propres caractéristiques aux autres phénomènes compliquent le problème mais nous libèrent de l'intervention de l'œil comme élément essentiel de mesure . L'œil n'ayant que très rarement des caractéristiques identiques à celles de l'œil moyen de la C.I.E. Le perfectionnement des cellules photoémissives, en particulier, doit permettre d'arriver à une sensibilité équivalente tout en bénéficiant de l'objectivité des mesures purement instrumentales .

Cependant, ces appareils sont encombrants, coûteux, nécessitent, pour leur manipulation une certaine compétence, exigent parfois une série de calculs pour parvenir au résultat cherché, ce qui entraîne une réponse différée .

Leur fidélité et leur stabilité permettent,par contre,d'obtenir une réponse identique dans l'espace et dans le temps

La comparaison directe de deux couleurs à l'œil paraît , évidemment, beaucoup plus simple . C'est la raison pour laquelle certains auteurs ont établi des atlas de couleur, dont l'étude est cependant très instructive car elle débouche sur une représentation plus tangible des couleurs .

A - VOLUME DES COULEURS D'OSTWALD, 1917

OSTWALD considère en premier lieu la couleur pure dont il fait varier progressivement l'albédo . Il est amené, de ce fait, à disposer ses couleurs suivant un volume qui a une forme biconique , les deux cônes étant opposés par leur base, le blanc pur est situé au sommet du premier, le noir pur au sommet du second .

Par conséquent, sur la droite les joignant, se trouve toute la gamme des gris . Les gris sont obtenus par mélange du blanc et du noir dans des proportions qui varient de façon telle que leur logarithme progresse de la même valeur, ceci pour satisfaire la loi de FECHNER qui veut que les sensations varient sensiblement comme le logarithme des excitations, ce qui doit se traduire, en fait, par une progression d'intervalles constants du point de vue psychologique, du blanc vers le noir , à savoir les pas des gris .

Sur la circonférence la plus grande sont situées les couleurs les plus pures qu'il soit possible d'obtenir au moyen de pigments. La pureté reste, cependant, inférieure à celle des couleurs spectrales.

Les couleurs , allant d'un côté, du blanc à une couleur déterminée en tenant compte de la loi de FECHNER, représentent tous les dégradés de la couleur pure mélangée à des proportions de plus en plus grandes de blanc . De même, sur la surface du cône à sommet noir, tous les mélanges contiennent une proportion de plus en plus grande de noir .

Sur une section du solide passant par les deux sommets , comprenant par conséquent la droite des gris, on obtient un losange formé de deux triangles équilatéraux accolés par leur base suivant la droite des gris dont le sommet représente une couleur pure, tandis que sur chacun des côtés s'étale en dégradé leur mélange, d'une part avec des quantités croissantes de blanc, d'autre part avec des quantités croissantes de noir .

A l'intérieur de chaque triangle et parallèlement aux côtés, on trouve le même dégradé de la couleur avec les gris . On trouve , ainsi, à partir d'un gris, en suivant une parallèle à l'un des côtés du côté du blanc, tous les mélanges ayant la même proportion de couleur et du côté noir tous les mélanges ayant la même proportion de noir .

Les premiers mélanges sont appelés isoteintes et désignés par les lettres de l'alphabet en allant du blanc vers la couleur . Les seconds, isotones, sont également désignés par les mêmes lettres de l'alphabet , en allant de la couleur cette fois-ci vers le noir .

Un nombre indiquant la couleur de base suivi des deux lettres isoteinte et isotone, permet de déterminer totalement la couleur et d'en permettre sa reproduction .

Les critiques que l'on peut formuler à l'égard du système d'OSTWALD sont les mêmes que celles des autres atlas : difficultés d'obtenir une pureté élevée aussi bien dans les couleurs que pour le blanc et le noir, dégradation des couleurs dans le temps, etc ...

Si nous avons exposé les idées d'OSTWALD, c'est avant tout pour l'intérêt que présente sa recherche d'une systématisation d'une échelle colorée dont nous pourrions nous inspirer pour la réalisation de nos teintiers, de telle sorte qu'une teinte déterminée puisse toujours être retrouvée parce que clairement désignée . Ceci éviterait la confusion actuelle due à l'utilisation de nombreuses échelles arbitraires .

B - SYSTEME DE MUNSELL

Le système de MUNSELL est probablement plus connu que celui d'OSTWALD en raison de l'édition d'un atlas après révision en 1929 aux Etats-Unis, de la définition de l'éclairage d'observation qui est celui de la lumière C et le perfectionnement des conditions de comparaison . Comme ce dernier, il utilise une représentation spatiale autour d'un axe des gris .

Mais alors qu'OSTWALD, après avoir sélectionné 100 couleurs comme pures les avait réduites à 24, MUNSELL n'utilise que 5 couleurs : une rouge R, une jaune Y, un vert G, un bleu B et un pourpre P , qu'il subdivise par la suite en 5 teintes complémentaires BG, YR, GY, PB, RP . Toutes les couleurs de même base sont situées sur des secteurs allant de l'axe central vers la périphérie, leur saturation allant croissant dans ce sens .

MUNSELL tient compte dans sa désignation des surfaces colorées du couple teinte-valeur . La teinte "T" représente la position de la couleur de base sur la circonférence, sa valeur "V", sa hauteur dans le solide donnée par l'échelle désignée à 10 échelons, sa saturation "S" qui est représentée par sa distance à l'axe des gris .

$\frac{T\ V}{S}$ définit par conséquent , sans ambiguité, la situation d'une couleur dans le solide de MUNSELL .

D'autres teintes ont été intercalées, par la suite, entre les teintes initiales, ce qui a divisé les intervalles entre deux couleurs initiales en 10 . Dans ce cas, la teinte est souvent précédée du chiffre correspondant, ce qui aboutit à une expression de la forme :

$6\,y\,\frac{7}{2}$ Teinte6y- valeur 7 - saturation 2 .

APPLICATION DU SYSTEME DE MUNSELL A LA DESIGNATION DES TEINTES DES DENTS

La teinte des dents se trouve limitée dans les secteurs compris entre le vert jaune et le jaune orangé encadrant , de part et d'autre, le jaune pur .

La valeur de cette dernière, c'est-à-dire sa situation dans l'échelle des gris, peut être obtenue à partir de la formule de MUNSELL :

$$V = \sqrt{100\,\rho}$$

où ρ est la réflectance lumineuse .

Quant à la saturation de la couleur des dents, elle est faible .

L'espace nécessaire à la reproduction de toutes les teintes dentaires est donc relativement restreint et il est encore possible de sélectionner dans cet espace le minimum de valeurs nécessaires .

Avec un peu d'expérience, que l'on ne peut manquer d'acquérir assez rapidement lorsqu'on exerce son œil à séparer teinte , valeur et saturation, on doit pouvoir limiter la sélection à quelques teintes avant de procéder à la comparaison directe qui permettra de déterminer l'assortiment le meilleur .

Il est certain , qu'apparemment, ce que nous appelons couramment la teinte varie du collet au bord incisif par exemple, alors qu'en réalité , c'est avant tout la valeur, c'est-à-dire la réflectance lumineuse ρ qui varie .

Il n'est pas davantage, dans notre pensée, de vouloir comparer directement la teinte d'une dent à une planche de l'album de MUNSELL, sachant à quels déboires on pourrait s'exposer en raison de l'influence des états de surface sur les appréciations .

Cependant, la réalisation d'échelles de teintes comprenant les dégradés habituels, présentés sous une forme anatomique semblable , mais dont la désignation tiendrait compte des conventions qui précèdent, nous rendraient certainement le plus grand service .

Notre choix serait guidé avec précision, en tenant compte de la valeur de chacun des paramètres essentiels avec la certitude de trouver l'équivalence, quel que soit le fournisseur . Les formes, ainsi que la nature du matériau, laissant aux fabricants un champ d'action largement suffisant, ou faire preuve d'originalité .

DEUXIEME PARTIE

INTRODUCTION A L'EXPERIMENTATION

Après avoir souligné la difficulté d'une définition sommaire de la teinte des dents et limité notre étude à la région du tiers cervical, nous avons précisé les phénomènes essentiels qui sont responsables, non seulement de la sensation colorée, mais, également, de la notion de couleur que l'on attribue en propre aux objets .

Il apparaît que sous diverses lumières blanches, dont nous avons précisé les conditions de reproduction, un même corps prend des teintes légèrement différentes .

La lumière incidente qui provient, généralement, d'une source primaire, c'est-à-dire génératrice, est diffusée en subissant une amputation partielle plus ou moins grande et l'objet ainsi éclairé devient une source secondaire dont la composition dépend de la répartition spectrale énergétique de la lumière incidente et des propres facteurs de luminance de ce dernier . La lumière diffusée résultante provoque chez un observateur des stimuli colorés qu'il associe à la couleur de l'objet .

Le dépouillement des spectres de la lumière ainsi diffusée permet donc, en utilisant des coefficients de distribution, de caractériser la couleur, telle qu'elle serait perçue par un observateur de référence lorsque l'objet est observé sous une lumière étalon spécifiée .

Après avoir exposé les théories d'OSTWALD et de MUNSELL, nous avons donné les raisons qui nous ont fait préférer la méthode instrumentale aux méthodes comparatives . Bien que plus complexe de réalisation et d'interprétation beaucoup plus difficile, elle présente l'inestimable avantage de toute mesure .

D'un côté, on a le bénéfice de la reproductibilité, de la fidélité, de la précision que peuvent nous donner les appareils lorsque les conditions opératoires sont bien définies, de l'autre, on doit subir

la dégradation des teintes de référence à l'usage, l'imprécision de la comparaison visuelle dans le temps, dans l'espace, d'un observateur à l'autre , etc ...

L'un des points les plus importants de la méthode instrumentale est certainement la géométrie de mesure . C'est elle , par conséquent qu'il nous faudra préciser dans une première partie .

Puis, nous procèderons à l'enregistrement des spectres d'un certain nombre de dents comparativement à la magnésie que nous dépouillerons ensuite pour obtenir la répartition spectrale des facteurs de luminance .

Enfin, en combinant la répartition spectrale énergétique de la lumière incidente, la lumière "C" par exemple, et celle des facteurs de luminance, en utilisant les coefficients de distribution et la méthode des ordonnées sélectionnées, nous pourrons en déduire les stimuli et les coordonnées trichromatiques permettant de situer la couleur de la dent étudiée dans le triangle international .

A partir de là, il nous sera possible de compléter les informations relatives à la teinte en déterminant la couleur dominante, la pureté d'excitation, la pureté colorimétrique et la réflectance donc la leucie . On aura ainsi défini les paramètres essentiels permettant de représenter avec le plus de précision possible la teinte d'une partie de la dent examinée .

Après celà, nous étudierons la fluorescence des dents qui modifie légèrement leur teinte d'autant plus que la teneur en ultraviolets de l'atmosphère, est plus élevée .

ADAPTATION D'UN SPECTROFLUOROMETRE AMINCO A LA DETERMINATION DE LA REPARTITION SPECTRALE DES LUMINANCES DES DENTS

ADAPTATION DU SPECTROGRAPHE

Nous avons utilisé un spectrographe à réseau Aminco, utilisé habituellement pour déterminer la fluorescence, que nous avons adapté à notre problème particulier .

Cet appareil comprend une lampe au xénon très soigneusement stabilisée, dont les longueurs d'ondes sont diffractées par un premier réseau qui envoie sur la fente d'entrée d'un puits , dans lequel on place le produit à étudier, une radiation de longueur d'onde bien déterminée .

La fluorescence ainsi excitée est observée à 90°, par rapport au faisceau incident et analysée par un deuxième réseau qui permet de procéder à l'analyse de spectre complet en diffractant chaque longueur d'onde de la lumière émise . Celles-ci viennent exciter une cellule photomultiplicatrice (P. M.) dont le courant de sortie est amplifié dans un densitomètre avant de figurer en ordonnées sur enregistreur en x y .

Dans le même temps, les longueurs d'ondes correspondantes viennent s'inscrire en abscisse car la rotation du réseau entraîné par un moteur électrique à vitesse variable se traduit par une différence de potentiel qui déplace le curseur suivant les x . On obtient ainsi la répartition spectrale énergétique de la lumière émise par l'échantillon étudié .

Cette deuxième partie de l'appareil permet donc de procéder à l'analyse spectrale au moyen du P. M. de la lumière qui y parvient .

Si l'on éclaire maintenant un objet diffusant, une dent, par exemple, située dans le puits, par la lumière provenant de la lampe au xénon en faisant en sorte que la lumière diffusée seule pénètre dans la partie analytique de l'appareil, on peut obtenir la courbe de répartition spectrale des luminances . Pour cela, on place, successivement, une surface de magnésie, puis la dent, ce qui donne deux enregistrements dont l'analyse longueur d'onde par longueur d'onde permet de tracer la courbe de variation du coefficient de réflexion diffusé en fonction des longueurs d'ondes .

CHOIX DE LA GEOMETRIE DE MESURE

La géométrie choisie pour l'étude de la lumière diffusée a son importance car le facteur de diffusion non seulement varie , pour certains matériaux, en fonction de la longueur d'onde, mais encore en fonction de la direction d'incidence et d'observation . Si l'on utilise une longueur d'onde et une direction d'incidence déterminée, on peut mesurer les indicatrices de diffusion à incidence constante en faisant varier la direction d'observation .

On peut également, maintenir constantes, longueur d'onde et direction d'observation et obtenir les indicatrices de diffusion à direction constante .

Lorsque les directions n'ont qu'une influence négligeable et que seule importe la longueur d'onde, le matériau est orthotrope.

Le cas des surfaces orthotropes est heureusement le plus fréquent, cependant, il est préférable de bien définir la géométrie des mesures étant donné les difficultés qu'elles présentent . Suivant l'état de surface, on peut opter pour un certain nombre de formules relativement restreintes .

1°- Dans le cas de surfaces opaques et lisses :

a) On peut utiliser un système simple qui correspond à un éclairement à 45° par faisceau dirigé et une observation à 0° qui se symbolise par 45°/0 .

b) On peut également utiliser la géométrie inverse éclairage normal 0,° observation à 45°, soit 0/45° .

2°- Dans le cas où les surfaces sont rugueuses ou le matériau structuré, on utilise une sphère photométrique creuse , la surface intérieure, blanc mat, est parfaitement diffusante .

a) Si la lumière incidente est diffusée par la sphère, on observe alors dans la direction normale à la surface soit à 0° et la géométrie se symbolise par d/0 .

b) Si au contraire, on éclaire la surface de l'échantillon normalement soit à 0°, on observe alors la lumière totale diffusée dans la sphère et la géométrie de mesure correspond alors à 0/d .

A - MONTAGE INITIAL UTILISANT LA GEOMETRIE LA PLUS SIMPLE

Nous avons voulu voir dans un premier temps quelle était la valeur des résultats obtenus en utilisant la géométrie la plus simple, c'est-à-dire en mesurant la réflexion diffuse de la surface éclairée sous une incidence proche de 60° par rapport à la normale de l'échantillon, l'observation ayant lieu à 30° par rapport à cette dernière .

Nous avons été tenu à cette formule étant donné la construction même du spectrofluoromètre prévu pour l'observation de la fluorescence provoquée dans un liquide, à 90°, par conséquent du rayonnement incident .

La réflexion ayant lieu à 60°, on pouvait voir à 30° le rayonnement diffusé sans être gêné par la réflexion spéculaire . De ce fait, le rayonnement de sortie se trouvait bien à 90° par rapport au rayonnement incident .

1°- Disposition des dents suivant la géométrie choisie .

Pour cela, nous avons placé la magnésie, d'une part, dans une petite cupule, située en arrière d'un diaphragme noirci porté par une plaque coulissante, parfaitement orientée pour respecter la géométrie adoptée et, d'autre part, sur une glissière identique, la dent à étudier, appliquée contre l'ouverture du diaphragme d'un support analogue à celui utilisé pour la magnésie où elle est maintenue par de la "piscéine" .

Par un dispositif à miroir et lentille, nous avons imposé un parcours différent à la lumière provenant de la lampe au xénon, de telle sorte qu'elle vienne tomber à 60°, directement sur les surfaces à observer .

Pour éviter l'influence des irrégularités de surface de la dent, susceptibles de faire apparaître des indicatrices de diffusion préférentielles, il a été procédé à un léger polissage, permettant d'obtenir une surface plane et polie au niveau du tiers cervical . Il ne pouvait , dans ces conditions, être question d'opérer in vivo, mais sur des dents fraîchement extraites et conservées dans du sérum physiologique .

Il est facile de constater que la dessication progressive de la dent à l'air libre entraîne une diminution de la translucidité de la substance interprismatique, ce qui donne lieu à un albédo plus élevé, correspondant à l'aspect minéral que l'on peut alors observer .

La cupule de magnésie étant mise en place pour un balayage du spectre obtenu par la rotation du réseau, nous permet d'enregistret une courbe de référence correspondant à des facteurs de réflexion diffuse de près de 100 % . On s'accorde pour attribuer 98 % à la magnésie, sans absorption sélective .

Le remplacement de la cupule de magnésie par la glissière portant la dent préparée donne, dans les mêmes conditions, une courbe correspondant à des facteurs de réflexion diffuse plus faibles résultant d'une absorption générale et représentant, en outre, des régions d'absorption sélective génératrices de stimuli colorés .

2°- Détermination des facteurs de réflexion diffuse à partir des enregistrements .

Le tracé obtenu sur l'enregistreur x y nous donne comparativement et pour chaque longueur d'onde les valeurs respectives des facteurs de réflexion diffuse de la dent étudiée et de la magnésie .

La magnésie étant considérée comme un diffuseur presque parfait, le rapport des ordonnées de chacune des courbes nous permet de calculer pour chaque longueur d'onde le facteur de luminance correspondant . Cependant, étant donné la forme générale du spectre émis par la lampe au Xénon, il est préférable de choisir les longueurs d'ondes qui correspondent à des parties horizontales des enregistrements. De la sorte, on obtient une précision plus grande qu'en utilisant les

régions à grande pente pour lesquelles il est difficile d'évaluer les ordonnées, ce qui peut fausser l'estimation des valeurs et donner lieu à une dispersion des points qui rend plus difficile le tracé de la courbe des facteurs de réflexion diffuse .

C'est la raison pour laquelle nous avons sélectionné quelques longueurs d'ondes où les courbes sont horizontales du fait, soit d'un palier, soit d'un minimum ou d'un maximum . Les autres points intermédiaires étant surtout utilisés comme confirmation .

Nous avons pris un exemple bien défini correspondant à l'analyse simultanée d'une dent naturelle et d'une dent artificielle . L'enregistrement nous donne les tracés de chacune des deux comparativement à la magnésie , courbe (8) .

Le Tableau IX a été établi en évaluant les ordonnées correspondant à la dent naturelle dans une première colonne, puis à la magnésie dans une deuxième colonne, tandis que leur rapport et la valeur des facteurs de réflexion diffuse se trouvent dans les colonnes suivantes .

Connaissant les facteurs relatifs à des longueurs d'ondes bien définies et réparties dans le spectre, il est possible de tracer alors la courbe de répartition spectrale des facteurs de luminance qui passe sensiblement par tous ces points expérimentaux . C'est ainsi que nous avons obtenu la courbe de la figure 10 qui donne pour chaque longueur d'onde la valeur de ρ_λ . Elle correspond à la courbe idéale moyenne des points expérimentaux à laquelle nous nous reporterons pour calculer $\bar{\gamma}\ \rho_\lambda$.

Fig. 3

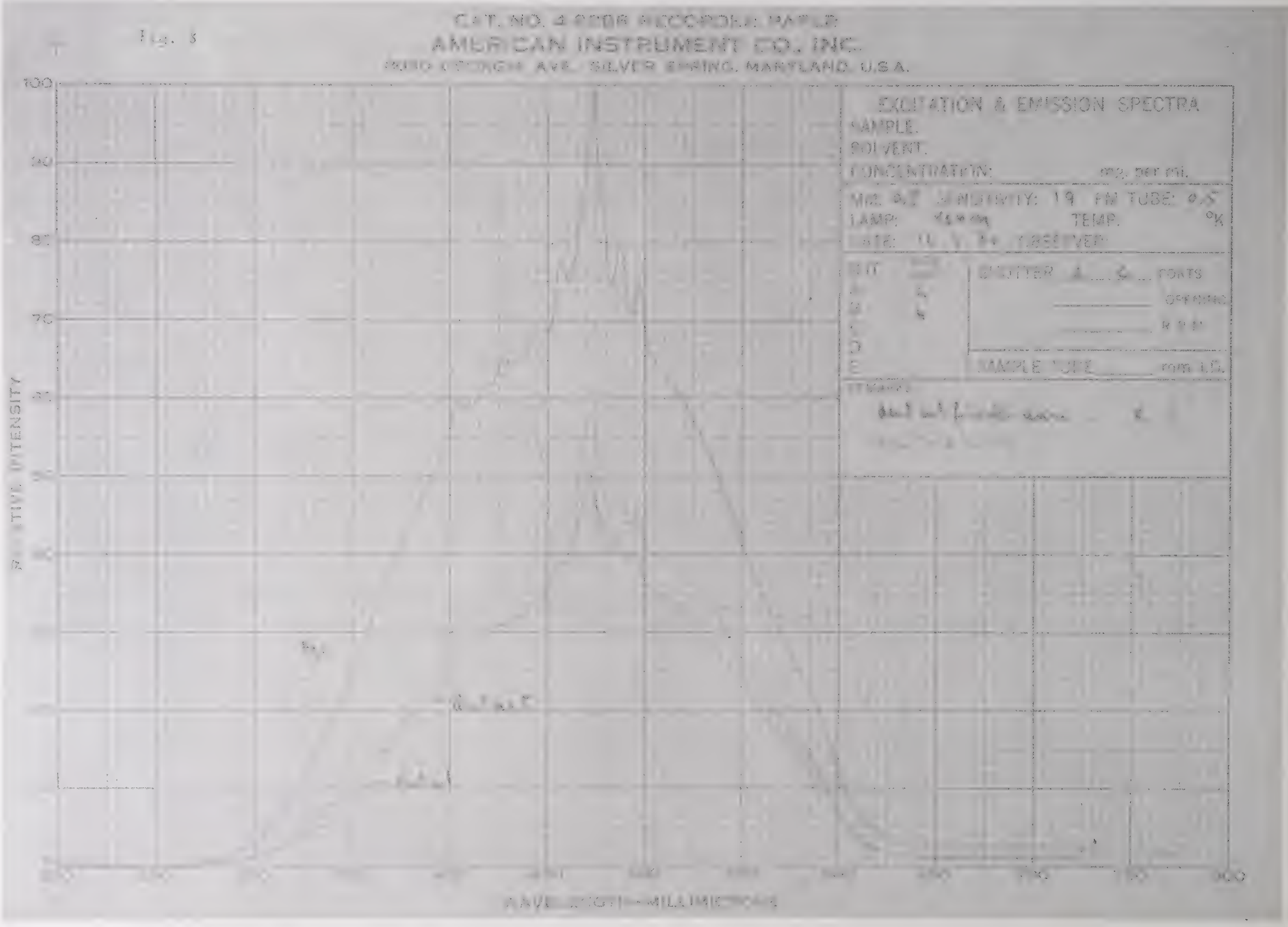

CAT. NO. 4 [illegible] RECORDER PAPER
AMERICAN INSTRUMENT CO., INC.
[illegible] GEORGIA AVE., SILVER SPRING, MARYLAND, U.S.A.
EXCITATION & EMISSION SPECTRA
SAMPLE:
SOLVENT:
CONCENTRATION: mg. per ml.
SENSITIVITY: 19 PM TUBE: 0.5
LAMP:
TEMP. °K
DATE:
OBSERVER:
SHUTTER
PORTS
OPENING
R.P.M.
SAMPLE TUBE mm I.D.
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
RELATIVE INTENSITY
WAVELENGTH—MILLIMICRONS

Tableau IX

Facteurs de réflexion diffuse de la dent tout au long du spectre résultant du rapport des ordonnées dent-magnésie des enregistrements

Longueur d'onde	Dent	Magnésie	$\rho_\lambda \times 100$
400	25,5	55,5	45,9
410	27,0	58,5	46,6
420	29,4	62,0	47,4
430	30,9	64,3	48,1
445	34,0	68,9	49,3
460	38,6	75,0	51,3
475	51,0	98,3	52,0
495	40,0	75,0	53,3
510	34,2	63,0	54,2
530	30,0	54,6	54,9
550	22,6	41,0	54,8
575	15,0	25,3	54,9
580	13,8	25,1	54,9

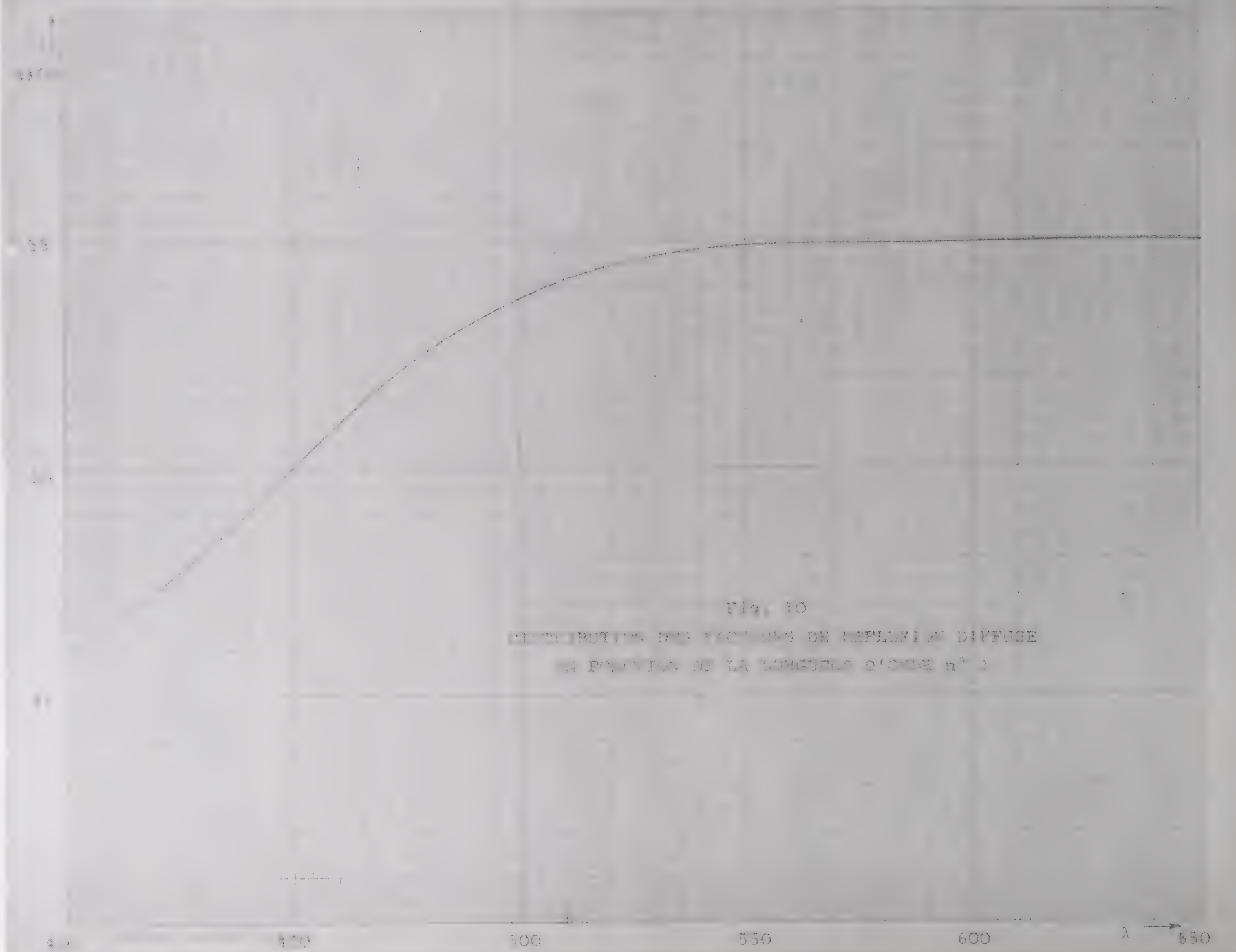


Fig. 10

DISTRIBUTION DES FACTEURS DE REFLEXION DIFFUSE
EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE n° 1

3°- Détermination des coordonnées dans le triangle international à partir des enregistrements obtenus .

Après avoir tracé la courbe des facteurs de réflexion diffuse, il nous est facile de calculer quels seront les stimuli produits par cette dent lorsqu'elle est observée sous un éclairage déterminé, ce qui permet alors de la situer dans le triangle chromatique international en déterminant ses coordonnées .

Nous avons voulu ainsi comparer les résultats obtenus, lorsque l'échantillon était examiné sous la lumière C, en utilisant les trois possibilités dont nous disposions :

a) La sommation des coefficients de distribution de la lumière C , après avoir multiplié chacun d'eux par le coefficient de réflexion diffuse correspondant .

b) En utilisant 30 ordonnées sélectionnées pour la lumière C

c) En réduisant leur nombre à 10 .

La comparaison de ces résultats doit nous permettre de choisir la méthode la plus rapide et la plus sûre pour parvenir à des résultats acceptables .

1- Par la première méthode utilisant les coefficients de distribution, nous avons porté dans le tableau XI en regard des longueurs d'ondes, les coefficients de distribution $\bar{x}_c$ $\bar{y}_c$ $\bar{z}_c$ de la lumière incidente, en face de chacun d'eux les produits respectifs de $\bar{x}_c$ $\bar{y}_c$ $\bar{z}_c$ et de ρ_λ donnant les coefficients de distribution de la lumière diffusée par la dent .

Nous avons donc trois colonnes $\bar{x}$ $\bar{y}$ $\bar{z}$ qui représentent les coefficients de distribution de la lumière diffusée . Il suffit de faire les totaux de chacune de ces colonnes pour obtenir les valeurs de X, Y et Z , d'où l'on peut tirer x , y et z les coordonnées trichromatiques cherchées .

soit : $X = 52,8995 \quad Y = 54,6345 \quad Z = 59,3951$

somme : $X + Y + Z = 166,9291$

d'où : $x = 0,3168$

$y = 0,3272$

$z = 0,3560$

2- Par la deuxième méthode des ordonnées sélectionnées, il suffit simplement de noter la valeur du coefficient de réflexion diffuse correspondant à chacune d'elles .

Dans le tableau XII , nous trouvons les 30 ordonnées sélectionnées en lumière C pour X, Y et Z . Nous avons placé en regard de chacune la valeur du coefficient de réflexion diffuse de l'échantillon étudié .

La somme sdes valeurs figurant dans chacune des colonnes relatives à X, Y et Z, multipliée par le facteur k correspondant, soit 3,268 pour les X, 3,333 pour les Y et 3,938 pour les Z, nous donne les valeurs des tristimuli X, Y et Z cherchés . D'où, comme précédemment, on obtient les coordonnés x, y et z .

soit : $X = 52,89 \quad Y = 54,65 \quad Z = 59,47$

$X + Y + Z = 167,01$

et $x = 0,3167$

$y = 0,3271$

$z = 0,3561$

3- Dans la troisième méthode, on réduit le nombre d'ordonnées sélectionnées à 10, ce qui augmente dans la même proportion la valeur du facteur K .

Ces ordonnées sont répérées par un astérisque dans le tableau des 30 ordonnées . Le processus de calcul est le même, seul change le facteur de multiplication qui est de 9, 805 pour X, 10 pour Y et 11, 813 pour Z . Cela nous donne de la même façon :

soit : $X = 52,89$ $Y = 54,67$ $Z = 59,49$

$X + Y + Z = 167,05$

et $x = 0,3166$

$y = 0,3272$

$z = 0,3561$

Tableau XI

Calcul des tristimuli en utilisant les coefficients de distribution de la lumière C et les facteurs de réflexion diffuse

λ	$\rho_\lambda \times 100$	$\bar{x}_c$	$\bar{x}$	$\bar{y}_c$	$\bar{y}$	z_c	$\bar{z}$
380	46,0	0,0022	0,0010	0,0000	0,0000	0,0101	0,0046
385	46,0	0,0042	0,0019	0,0001	0,0000	0,0200	0,0092
390	46,0	0,0095	0,0043	0,0003	0,0001	0,0448	0,0206
395	46,0	0,0200	0,0092	0,0006	0,0003	0,0945	0,0434
400	46,0	0,0429	0,0197	0,0012	0,0005	0,2036	0,0936
405	46,2	0,0784	0,0362	0,0022	0,0010	0,3727	0,1721
410	46,6	0,1633	0,0760	0,0046	0,0021	0,7784	0,3627
415	47,0	0,3279	0,1541	0,0091	0,0042	1,5681	0,7370
420	47,4	0,6193	0,2935	0,0184	0,0087	2,9755	1,4103
425	47,7	1,0595	0,5053	0,0361	0,0172	5,1258	2,4450
430	48,1	1,4989	0,7209	0,0612	0,0294	7,3138	3,5179
435	48,6	1,8070	0,8782	0,0931	0,0452	8,9263	4,3381
440	49,0	1,9794	0,9699	0,1312	0,0642	9,9292	4,8653
445	49,5	2,0194	0,9996	0,1730	0,0856	10,3424	5,1194
450	50,0	1,9578	0,9789	0,2213	0,1106	10,3227	5,1613
455	50,5	1,8534	0,9359	0,2786	0,1406	10,1418	5,1216
460	51,0	1,6818	0,8577	0,3469	0,1769	9,6501	4,9215
465	51,5	1,4527	0,7481	0,4273	0,2200	8,8404	4,5528
470	51,9	1,1359	0,5895	0,5291	0,2746	7,4882	3,8863
475	52,3	0,8287	0,4334	0,6563	0,3432	6,0761	3,1778
480	52,6	0,5565	0,2927	0,8088	0,4254	4,7295	22,4877
485	52,9	0,3346	0,1770	0,9774	0,5170	3,5578	1,8820
490	53,2	0,1815	0,0965	1,1790	0,6272	2,6361	1,4024
495	53,5	0,0808	0,0432	1,4195	0,7594	1,9391	1,0374
500	53,7	0,0259	0,0139	1,7004	0,9131	1,4320	0,7669
505	53,9	0,0122	0,0065	2,0460	1,1027	1,0665	0,5748
510	54,2	0,0448	0,0242	2,4165	1,3097	0,7599	0,4118
515	54,3	0,1352	0,0734	2,8224	1,5325	0,5183	0,2814
520	54,5	0,2879	0,1569	3,2309	1,7608	0,3561	0,1940

Tableau XI (suite)

λ	$\rho_\lambda \times 100$	$\bar{x}_c$	$\bar{x}$	$\bar{y}_c$	$\bar{y}$	$\bar{z}_c$	$\bar{z}$
525	54,6	0,4983	0,2720	3,6050	1,9683	0,2601	0,1420
530	54,7	0,7615	0,4165	3,9671	2,1700	0,1940	0,1064
535	54,8	1,0598	0,5807	4,2941	2,3531	0,1401	0,0767
540	54,8	1,3923	0,7629	4,5742	2,5066	0,0976	0,0534
545	54,9	1,7561	0,9640	4,7842	2,6265	0,0654	0,0359
550	54,9	2,1414	1,1756	4,9156	2,6986	0,0433	0,0237
555	54,9	2,5409	1,3949	4,9636	2,7250	0,0286	0,0157
560	55,0	2,9397	1,6168	4,9203	2,7061	0,0191	0,0105
565	55,0	3,3161	1,8238	4,7847	2,6315	0,0131	0,0072
570	55,0	3,6616	2,0138	4,5736	2,5154	0,0099	0,0054
575	55,0	3,9624	2,1793	4,3052	2,3678	0,0081	0,0044
580	55,0	4,2081	2,3144	3,9958	2,1976	0,0070	0,0038
585	55,0	4,3853	2,4119	3,6580	2,0119	0,0061	0,0033
590	55,0	4,4932	2,4712	3,3132	1,8222	0,0041	0,0022
595	55,0	4,5261	2,4893	2,9770	1,6373	0,0032	0,0017
600	55,0	4,4735	2,4604	2,6580	1,4619	0,0023	0,0012
605	55,0	4,3605	2,3982	2,3642	1,3003	0,0015	0,0008
610	55,0	4,1632	2,2897	2,0881	1,1484	0,0011	0,0006
615	55,0	3,8875	2,1381	1,8275	1,0051	0,0008	0,0004
620	55,0	3,5351	1,9443	1,5763	0,8669	0,0006	0,0003
625	55,0	3,1076	1,7091	1,3275	0,7301	0,0004	0,0002
630	55,0	2,6549	1,4601	1,0952	0,6023	0,0002	0,0001
635	55,0	2,2357	1,2296	0,8954	0,4924	0,0001	0,0000
640	55,0	1,8466	1,0156	0,7216	0,3968		
645	55,0	1,4912	0,8201	0,5713	0,3142		
650	55,0	1,1744	0,6459	0,4432	0,2437		
655	55,0	0,9056	0,4980	0,3378	0,1857		
660	55,0	0,6808	0,3744	0,2518	0,1384		
665	55,0	0,4963	0,2729	0,1825	0,1003		
670	55,0	0,3542	0,1948	0,1297	0,0713		
675	55,0	0,2552	0,1403	0,0931	0,0512		
680	55,0	0,1845	0,1014	0,0671	0,0369		

Tableau XI (suite)

λ	$\rho_\lambda \times 100$	$\bar{x}_c$	$\bar{x}$	$\bar{y}_c$	$\bar{y}$	$\bar{z}_c$	$\bar{z}$
685	55,0	0,1269	0,0697	0,0460	0,0253		
690	55,0	0,0854	0,0469	0,0309	0,0169		
695	55,0	0,0582	0,0320	0,0210	0,0115		
700	55,0	0,0407	0,0223	0,0147	0,0080		
705	55,0	0,0281	0,0154	0,0101	0,0055		
710	55,0	0,0198	0,0108	0,0071	0,0039		
715	55,0	0,0136	0,0074	0,0049	0,0024		
720	55,0	0,0093	0,0051	0,0034	0,0018		
725	55,0	0,0063	0,0034	0,0023	0,0012		
730	55,0	0,0044	0,0024	0,0010	0,0008		
735	55,0	0,0030	0,0016	0,0011	0,0005		
740	55,0	0,0020	0,0011	0,0007	0,0003		
745	55,0	0,0014	0,0007	0,0005	0,0002		
750	55,0	0,0009	0,0004	0,0003	0,0001		
755	55,0	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001		
760	55,0	0,0005	0,0002	0,0001	0,0000		
765	55,0	0,0003	0,0001	0,0001	0,0000		
770	55,0	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000		

$$\Sigma \bar{x} = X = 52,8995$$

$$\Sigma \bar{y} = Y = 54,6345$$

$$\Sigma \bar{z} = Z = 59,3951$$

$$X + Y + Z = 166,9291$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{52,8995}{166,9291} = 0,3168$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{54,6345}{166,9291} = 0,3272$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{59,3951}{166,9291} = 0,3560$$

Tableau XII

Calcul des tristimuli par les ordonnées sélectionnées pour la lumière C en utilisant 30 et 10 ordonnées

X_C	$\rho_\lambda \times 100$	Y_C	$\rho_\lambda \times 100$	Z_C	$\rho_\lambda \times 100$
424,4	47,7	465,9	51,6	414,1	46,9
. 435,5	48,6	. 489,4	53,2	. 422,2	47,6
443,9	49,4	500,4	53,7	426,3	47,8
452,1	50,2	508,7	54,1	429,4	48,1
. 461,2	51,1	. 515,1	54,3	. 432,0	48,3
474,0	52,2	520,6	54,5	434,3	48,5
531,2	54,7	525,4	54,6	436,5	48,7
. 544,3	54,8	. 529,8	54,7	. 438,6	48,9
552,4	54,9	533,9	54,8	440,6	49,0
558,7	55,0	537,7	54,8	442,5	49,2
. 564,1	55,0	. 541,4	54,8	. 444,4	49,4
568,9	55,0	544,9	54,8	446,3	49,6
573,2	55,0	548,4	54,9	448,2	49,8
. 577,3	55,0	. 551,8	54,9	. 450,1	50,0
581,3	55,0	555,1	54,9	452,1	50,2
585,0	55,0	558,5	55,0	454,0	50,4
. 588,7	55,0	. 561,9	55,0	. 455,9	50,6
592,4	55,0	565,3	55,0	457,9	50,8
596,0	55,0	568,9	55,0	459,9	51,0
. 599,6	55,0	. 572,5	55,0	. 462,0	51,1
603,3	55,0	576,4	55,0	464,1	51,3
607,0	55,0	580,5	55,0	466,3	51,6
. 610,9	55,0	. 584,8	55,0	. 468,7	51,8
615,0	55,0	589,6	55,0	471,4	51,9
619,6	55,0	594,8	55,0	474,3	52,1
. 624,2	55,0	. 600,8	55,0	. 477,7	52,4
629,8	55,0	607,7	55,0	481,8	52,7
636,6	55,0	616,1	55,0	487,2	53,0
. 645,9	55,0	. 627,3	55,0	. 495,2	53,5
663,0	55,0	647,4	55,0	511,2	54,1

Les 10 ordonnées sélectionnées sont repérées par un astérisque.

Calcul par les 30 ordonnées :

Totaux respectifs divisés par 100 $X_{30} = \frac{1.618,9}{100}$ $Y_{30} = \frac{1.639,6}{100}$ $Z_{30} = \frac{1.510,3}{100}$

Facteurs K_{30} correspondants 3,268 3,333 3,938

Produits $X = 52,89$ $Y = 54,65$ $Z = 59,47$

$X + Y + Z = 167,01$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{52,89}{167,01} = 0,3167$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{54,65}{167,01} = 0,3271$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{59,47}{167,01} = 0,3561$$

Calcul par les 10 ordonnées :

Totaux respectifs divisés par 100 $X_{10} = \frac{539,5}{100}$ $Y_{10} = \frac{546,7}{100}$ $Z_{10} = \frac{503,6}{100}$

Facteurs K_{10} correspondants 9,805 10 11,813

Produits $X = 52,89$ $Y = 54,67$ $Z = 59,49$

$X + Y + Z = 167,05$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{52,89}{167,05} = 0,3166$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{54,67}{167,05} = 0,3272$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{59,49}{167,05} = 0,3561$$

Les conclusions que nous pouvons tirer de ces différentes méthodes de calcul montrent que les écarts qui peuvent être constatés n'intéressent que la quatrième décimale et n' ont aucune incidence sur la détermination de la couleur car on dispose d'un certain degré de liberté dû à l'importance du seuil de perception différentiel .

Si nous nous sommes livré à cet exercice, c'est avant tout pour démontrer l'identité pratique des résultats obtenus aussi bien en utilisant les coefficients de distribution que les ordonnées sélectionnées . Dans ce dernier cas, nous avons volontairement choisi les possibilités extrêmes puisque nous avons réduit de 30 à 10 le nombre des ordonnées .

Nous avons effectué par la suite, comme nous le montrerons un peu plus loin , le même type de calcul en comparant ces différentes méthodes, ce qui nous a permis d'opter définitivement dans le cas bien précis des teintes dentaires pour la plus simple, à savoir les 10 ordonnées sélectionnées .

Cette dernière façon de procéder nous permet d'obtenir très rapidement les coordonnées trichromatiques à partir de la courbe des facteurs de réflexion diffuse .

Ces résultats peuvent être figurés sur une portion du diagramme triangulaire avec pour effet immédiat la possibilité de calculer la couleur dominante, la pureté d'excitation ou la pureté colorimétrique . Ceci, joint à la valeur de Y, qui correspond à la réflectance et permet d'évaluer la leucie, situe parfaitement la teinte étudiée .

B - UTILISATION D'UN DENSITOMETRE 0/45° POUR LA MESURE DES REFLECTANCES

Les résultats obtenus avec le montage précédent sur spectrofluoromètre nous ont permis d'obtenir un classement valable des teintes par une analyse sélective des facteurs de réflexion diffuse auxquels venait se surajouter l'effet dû à la fluorescence des dents étudiées excitées par la fraction ultraviolette de la lampe au xénon . Cependant, si le classement des teintes était semblable à celui résultant de l'observation visuelle, les valeurs obtenues pour la réflectance paraissaient être légèrement plus basses .

C'est la raison pour laquelle nous avons poursuivi l'expérimentation en utilisant un appareil destiné à cet usage : le Densitomètre MACBETH .

Dans ce dernier, la surface à étudier est éclairée suivant la normale, le rayonnement diffusé à 45° étant repris par une cupule qui les renvoie sur un photomultiplicateur . Des filtres, soit neutres, soit colorés, peuvent être introduits à volonté sur le trajet des rayons lumineux . En particulier :

- le filtre KODAK WRATTEN rouge n°25 qui coupe le spectre en deça de 590 mμ et dont la dominante en lumière A est de 617 mμ .

- le filtre KODAK WRATTEN vert n°58 qui coupe le spectre en deça des 470 mμ et au-delà de 610 mμ et dont la dominante en lumière A est de 538 mμ .

- le filtre KODAK WRATTEN bleu n°47 qui coupe le spectre au-delà de 530 mμ et dont la dominante en lumière A est 475 mμ .

Un couple d'étalons permet le réglage de zéro de l'appareil vers le bas et vers le haut de l'échelle et une gamme étalon, également livrée avec l'appareil, donne la possibilité d'en vérifier l'exactitude pour toutes les valeurs intermédiaires .

La surface de travail est petite, son diamètre est de 3 mm. La tête de mesure est indépendante de l'ensemble générateur amplificateur et peut être facilement tenu à la main . En abaissant le bloc, filtres photomultiplicateurs , sur la cupule, on alimente à sa tension maxima, la lampe d'éclairement .

Nous avions donc là un appareil de manipulation facile, susceptible d'effectuer, en utilisant le filtre neutre, des mesures de réflectance non seulement in vitro, mais également in vivo .

L'utilisation des filtres Bleu, Vert et Rouge permettent de mesurer la réflectance dans la bande bleue, verte ou rouge, couverte par ces derniers et , par conséquent de classer, da façon relative, des surfaces colorées les unes par rapport aux autres sans qu'il soit possible, cependant, d'en calculer les coordonnées trichromatiques et situer une teinte dans le triangle international .

L'appareil est,par contre,parfaitement adapté à la mesure des réflectances, il devrait permettre, par conséquent, d'apprécier la "valeur" de la teinte, c'est-à-dire son degré de gris .

Les mesures que nous avons effectuées, aussi bien sur les dents vivantes que sur les dents extraites, nous ont cependant donné toujours une réflectance apparemment par défaut par rapport à celle que l'on pouvait constater visuellement .

Pour expliquer ce phénomène, nous avons effectué des séries de mesures sur des surfaces diffusantes, planes, telles que des papiers plus ou moins foncés . Puis, nous avons recouvert ces papiers de feuilles de cellophane transparentes : cette opération n'amenant qu'une modification imperceptible de la luminance à l'observation visuelle, par contre, les mesures au densitomètre accusaient, toutes, une baisse très sensible de la réflectance mesurée .

Le phénomène était du même ordre en utilisant des pigments dispersés dans un vernis transparent . Dans les deux cas, l'écart augmentait avec l'épaisseur de ce dernier .

L'explication de cette réflectance par défaut paraît résider dans le trajet de la lumière diffusée, rasante, qui se perd dans l'épaisseur du milieu translucide sans être réfléchie vers la cupule qui ne peut la capter .

Cet appareil nous a permis d'effectuer un classement des dents en fonction de leur réflectance très proche de celle obtenue au moyen du spectrofluoromètre Aminco . Les deux procédés nous ont donné des valeurs comparables mais apparemment par défaut par rapport aux impressions visuelles .

Ces résultats bien que valables en valeur relative devaient nous amener , tout naturellement, à repenser la géométrie de mesure pour parvenir à une approche plus satisfaisante, ceci nous a conduit à envisager l'utilisation d'une sphère photométrique malgré les complications supplémentaires que cela entraîne .

C - ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS PAR LES METHODES PRECEDENTES

Ces premières expériences qui ne sont pas totalement concluantes, nous montrent la facilité avec laquelle peuvent se créer des artéfacts susceptibles de fausser les résultats de la mesure en l'absence d'une géométrie parfaitement étudiée et définie .

Dans le premier cas, nous utilisions un montage susceptible de donner théoriquement satisfaction mais qui n'en était pas moins un prototype avec toutes les incertitudes qui recouvrent ce terme .

Mais dans le deuxième cas, nous utilisions un appareil éprouvé, conçu et réalisé pour mesurer les réflectances de surfaces diffusantes colorées .

Sur des surfaces opaques, cet appareil nous a toujours donné des résultats concordant avec sa propre gamme étalon et avec les sensations visuelles ressenties lorsqu'on observe la réflectance de la surface étudiée .

Les résultats par défaut obtenus quand on opère sur une surface dentaire ne peuvent s'expliquer que par la structure particulière de cette dernière qui est translucide et dans l aquelle une partie de la lumière pénétrant au cours de la réflexion vitreuse se trouve partiellement diffusée et renvoyée par les substances amelaires et dentinaires .

D - REALISATION ET ADAPTATION D'UNE SPHERE PHOTOMETRIQUE SUR SPECTROFLUOROMETRE AMINCO

La critique que l'on peut faire aux méthodes précédentes est de ne capter qu'une partie de la lumière diffusée suivant une certaine section dans l'espace . Ceci ne porte guère à conséquence, car les corps sont, généralement, orthotropes mais, dans le cas de solides structurés et en présence d'états de surface particuliers, des indicatrices de diffusion n'ont pas la même valeur en fonction de l'angle d'observation . Cet échantillonnage partiel de la lumière diffusée donne lieu, alors, à des mesures par défaut, car on cherche à se prémunir contre les erreurs dues à l'influence de la réflexion spéculaire .

Les résultats sont, cependant, satisfaisants dans certains cas bien précis et le densitomètre donne des valeurs correctes de la réflectance de surfaces opaques diffusantes .

La sphère photométrique présente l'avantage d'obtenir des valeurs où l'influence de la surface ou de la structure n'intervient plus. C'est la raison pour laquelle nous avons finalement choisi cette solution.

En effet, étant donné la répartition variable de l'intensité lumineuse dans l'espace autour du point d'incidence, si l'on capte toute la lumière diffusée, on réalise l'intégration de toutes les indicatrices et lève le handicap angulaire . La sphère photométrique ou d'intégration permet de réaliser cette opération .

Dans ce cas, la lumière incidente peut tomber normalement sur la surface à étudier et toute la lumière diffusée est captée par la sphère dont on mesure le flux lumineux émis par une surface quelconque située, le plus souvent, à 90° par rapport à celle qui est éclairée . La géométrie correspondante est alors désignée par o/d . On étalonne par rapport à la magnésie, par exemple, pour obtenir soit le facteur de luminance ou facteur de réflexion diffuse pour une longueur d'onde déterminée, soit la réflectance générale .

Mais, de même que l'on peut étudier les indicatrices de diffusion à incidence constante ou à incidence variable, l'angle d'observation restant alors constant . On peut également utiliser la sphère pour éclairer la surface par un flux lumineux , non plus dirigé mais totalement diffusé, l'illuminant sous toutes les incidences . L'observation ayant lieu dans une direction déterminée, le plus souvent normale à la surface . Géométrie que l'on schématise par d/o . C'est cette dernière technique que nous avons utilisée .

Une telle sphère doit satisfaire à un certain nombre de conditions que nous nous sommes astreint à respecter ; en particulier, la superficie des ouvertures doit être inférieure à 2 % de la surface interne de la sphère .

Le revêtement intérieur diffusant doit lui donner un coefficient de diffusion au moins égal ou supérieur à 0, 98 .

L'ouverture correspondant à l'emplacement de l'échantillon doit être finie par polissage jusqu'à l'obtention de bords effilés , de telle sorte que la surface de celui-ci soit sensiblement tangente à la surface interne de la sphère et lui permette de recevoir la lumière rasante .

Nous avons donc utilisé une sphère de 40 mm de diamètre, blanchie intérieurement et aménagée pour recevoir le rayonnement incident, l'échantillon et laisser sortir la lumière diffusée .

L'ouverture par laquelle pénètre le rayonnement a été choisie de 5 mm de diamètre . La surface de l'échantillon soumise à l'expérimentation est de 7 mm^2 environ correspondant à un diamètre de 3 mm et située sur le grand cercle perpendiculaire à celui passant par l'ouverture d'entrée , elle est protégée contre le rayonnement réfléchi, par un petit écran situé entre le point d'arrivée du flux lumineux et elle-même .

La lumière diffusée par l'échantillon est reprise par une lentille de 9 mm portée par un tube diaphragmé, pénétrant légèrement dans la sphère de façon à former écran et noirci intérieurement de façon à empêcher toute lumière parasite, autre que celle provenant de l'échantillon, d'atteindre la lentille .

Cette dernière est réglée de telle sorte que sa caustique couvre au mieux l'échantillon, sans déborder, en donnant à la sortie des rayons sensiblement parallèles .

Le rayonnement émergeant est diffracté par le réseau du spectrofluoromètre et sélectionné avant de venir exciter le tube photomultiplicateur faisant partie de l'ensemble densitométrique dont le courant de sortie est enregistré en ordonnées dans le montage x y utilisé précédemment .

Les abscisses sont parcourues en relation avec la longueur d'onde de la lumière incidente .

En opérant comparativement avec un échantillon témoin de magnésie, remplacé immédiatement après par l'échantillon à essayer, nous obtenons deux enregistrements superposés qui nous permettent, par dépouillement, d'obtenir la courbe des facteurs de réflexion diffuse de l'échantillon en fonction de la longueur d'onde .

Le traitement de la courbe ainsi obtenue en utilisant les coefficients de distribution nous permettent d'obtenir par le calcul, soit par intégration directe, soit par la méthode des ordonnées sélectionnées, la valeur des tristimuli définissant la couleur et sa situation dans le triangle chromatique d'une part, la réflectance lumineuse générale ou albédo d'autre part, ce qui permet de la situer dans la gamme des gris donnée par la veleur de Y .

L'opération s'achève donc après avoir situé la couleur dans le triangle chromatique, par le calcul de la dominante et celui de la pureté d'excitation . Nous déterminons ainsi parfaitement λ , p_e et Y qui définissent les trois paramètres D, P, R (dominante, pureté, réflectance) que nous voulions obtenir .

Pour illustrer de façon plus précise la succession des opérations effectuées pour parvenir à ces résultats, nous allons les développer en les appliquant à un exemple concret en traitant les informations données par l'une des courbes enregistrées .

DETERMINATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA TEINTE

1°- Détermination des coefficients de réflexion diffuse tout au long du spectre .

Nous faisons le rapport longueur d'onde pour longueur d'onde de 5 en 5 mμ de la réflectance de la dent étudiée à celle de la magnésie considérée comme un diffuseur parfait ρ # 98 % .

Les résultats collationnés dans le tableau XIII nous permettent de tracer la courbe des coefficients de réflexion en portant en abscisse les longueurs d'ondes et en ordonnées les valeurs obtenues pour les coefficients de réflexion diffuse ρ_λ qui fait l'objet de la figure (XIV) .

2°- Détermination des tristimuli X Y Z correspondant au système trichromatique international en lumière C.

Lorsque la dent est éclairée par une lumière correspondant à l'étalon C qui nous place dans les conditions d'une observation à la lumière du jour indirecte, celle-ci est diffusée de façon sélective . Pour chaque longueur d'onde, la fraction diffusée est fonction du coefficient de réflexion diffuse correspondant .

Pour situer la dent dans le triangle chromatique, il faut donc tenir compte à la fois des facteurs de réflexion diffuse et de la répartition énergétique de la lumière incidente .

Tableau XIII

Facteurs de réflexion diffuse de la dent tout au long du spectre résultant du rapport des ordonnées dent-magnésie des enregistrements

Longueur d'onde	Dent	Magnésie	$\rho_\lambda \times 100$
400	26,6	58,0	45,8
410	26,2	57,1	45,9
420	27,7	60,2	46,0
430	28,9	62,5	46,2
445	31,4	66,9	46,9
460	35,1	72,8	48,2
475	44,7	90,2	49,6
490	36,8	72,2	50,9
495	35,6	69,0	51,5
510	32,1	60,5	53,1
530	29,1	52,9	55,0
550	22,8	40,6	56,3
575	15,3	26,9	56,9
580	13,9	24,4	56,9

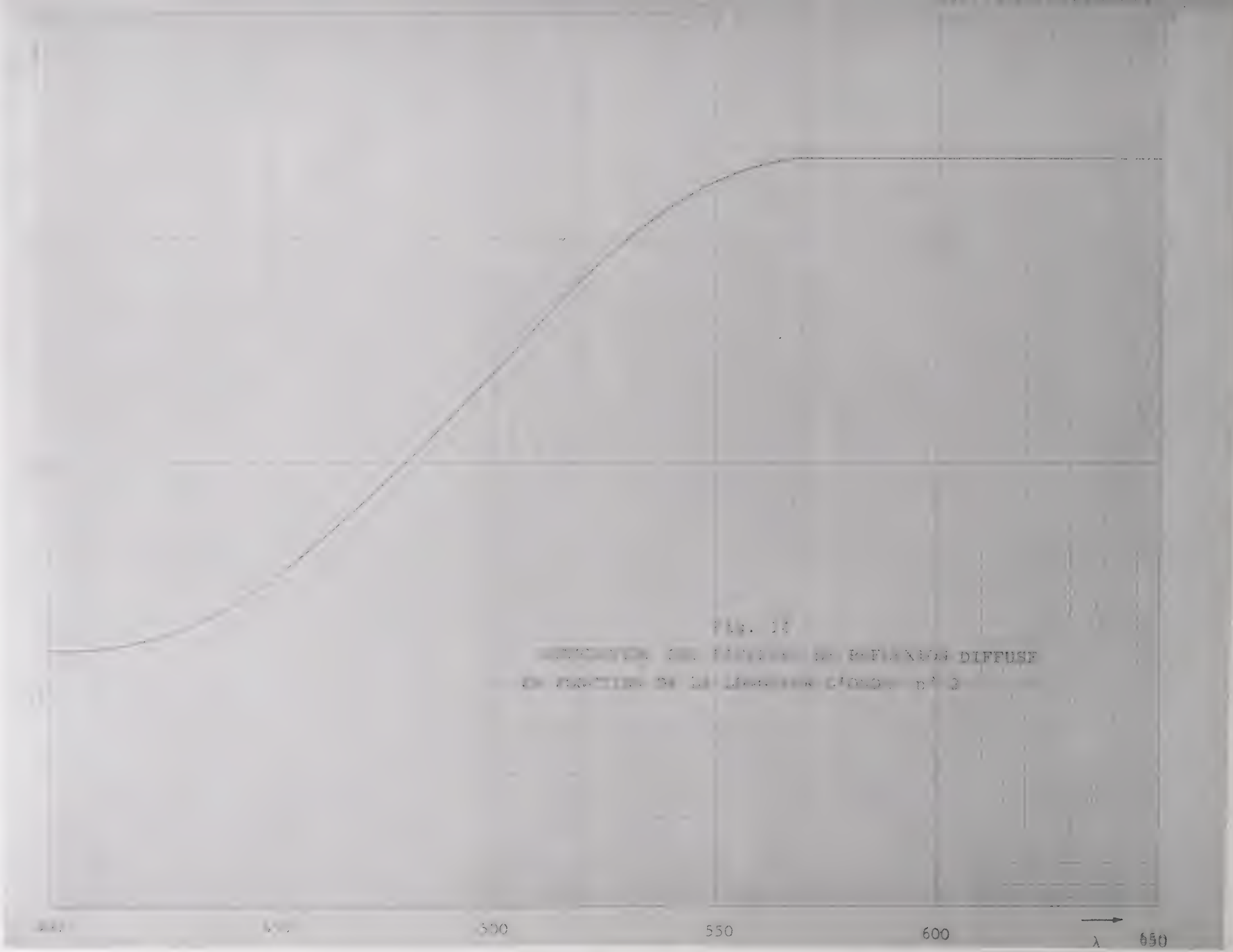


Fig. 11
[illegible] DIFFUSE
[illegible]

3°- Détermination des coordonnées trichromatiques .

Pour cette détermination, on peut utiliser l'une des deux méthodes déjà exposées :

a) En utilisant les coefficients de distribution relatifs à chaque longueur d'onde, en faisant pour chacune d'entre elles le produit des coefficients de distribution multipliés par le coefficient de réflexion diffuse de la dent pour la longueur d'onde considérée . La somme de chacun de ces résultats permettant d'évaluer les stimuli X, Y ou Z (tableau XV) .

b) En utilisant les ordonnées sélectionnées correspondant à la lumière C . Il suffit, pour cela, de noter le coefficient de réflexion diffuse relatif à chacune d'entre elles, respectivement pour les stimuli X, Y et E . On fait la somme des valeurs trouvées dans chacune des colonnes et multiplie par le coefficient k approprié.

Nous avons fait le calcul en utilisant trente ordonnées pour chacun des stimuli dans un premier temps (tableau XVI) . Par la suite, nous nous sommes limité à dix valeurs seulement étant donné les variations relativement lentes du coefficient de réflexion diffuse au long du spectre (tableau XVI avec astérisque) .

On peut constater la faible différence entre les résultats obtenus par ces différentes méthodes, ce qui nous permet de retenir la plus simple, c'est-à-dire celle des ordonnées sélectionnées limitées à 10 . Ces différentes méthodes donnent des résultats très comparables ce qui nous permettra à l'avenir d'utiliser la plus simple et la plus rapide .

Tableau XV (A)

Calcul des tristimuli en utilisant les coefficients de distribution de la lumière C et les facteurs de réflexion diffuse

λ	$\rho_\lambda \times 100$	$\bar{x}_c$	$\bar{x}$	$\bar{y}_c$	$\bar{y}$	$\bar{z}_c$	$\bar{z}$
380	45,8	0,0022	0,0010	0,0000	0,0000	0,0101	0,0046
385	45,8	0,0042	0,0019	0,0001	0,0000	0,0200	0,0091
390	45,8	0,0095	0,0043	0,0003	0,0001	0,0448	0,0205
395	45,8	0,0200	0,0091	0,0006	0,0002	0,0945	0,0432
400	45,8	0,0429	0,0196	0,0012	0,0005	0,2036	0,0932
405	45,8	0,0784	0,0359	0,0022	0,0010	0,3727	0,1706
410	45,8	0,1633	0,0747	0,0046	0,0021	0,7784	0,3566
415	45,9	0,3279	0,1505	0,0091	0,0041	1,5681	0,7197
420	46,0	0,6193	0,2848	0,0184	0,0084	2,9755	1,3687
425	46,1	1,0595	0,4884	0,0361	0,0166	5,1258	2,3629
430	46,2	1,4989	0,6924	0,0612	0,0282	7,3138	3,3789
435	46,4	1,8070	0,8384	0,0931	0,0431	8,9263	4,1418
440	46,6	1,9794	0,9224	0,1312	0,0611	9,9292	4,6270
445	46,9	2,0194	0,9470	0,1730	0,0811	10,3424	4,8505
450	47,3	1,9578	0,9260	0,2213	0,1046	10,3227	4,8826
455	47,7	1,8534	0,8840	0,2786	0,1328	10,1418	4,8376
460	48,2	1,6818	0,8106	0,3469	0,1672	9,6501	4,6513
465	48,6	1,4527	0,7060	0,4278	0,2079	8,8404	4,2964
470	49,0	1,1359	0,5565	0,5291	0,2592	7,4882	3,6692
475	49,5	0,8287	0,4102	0,6563	0,3248	6,0761	3,0076
480	50,0	0,5565	0,2782	0,8088	0,4044	4,7295	2,3649
485	50,5	0,3346	0,1689	0,9774	0,4935	3,5578	1,7966
490	50,9	0,1815	0,0923	1,1790	0,6001	2,6361	1,3417
495	51,4	0,0808	0,0415	1,4195	0,7296	1,9391	0,9966
500	52,0	0,0259	0,0134	1,7004	0,8842	1,4320	0,7446
505	52,6	0,0122	0,0064	2,0460	1,0761	1,0665	0,5609
510	53,1	0,0448	0,0237	2,4165	1,2831	0,7599	0,4035
515	53,7	0,1352	0,0726	2,8224	1,5156	0,5183	0,2783
520	54,2	0,2870	0,1555	3,2309	1,7511	0,3561	0,1900

Tableau XV (B)

Calcul des tristimuli en utilisant les coefficients de distribution de la lumière C et les facteurs de réflexion diffuse

λ	$\rho_\lambda \times 100$	$\bar{x}_c$	$\bar{x}$	$\bar{y}_c$	$\bar{y}$	$\bar{z}_c$	$\bar{z}$
525	54,6	0,4983	0,2719	3,6050	1,9683	0,2601	0,1420
530	55,0	0,7615	0,4188	3,9671	2,1819	0,1940	0,1067
535	55,4	1,0598	0,5871	4,2941	2,3789	0,1401	0,0776
540	55,7	1,3923	0,7755	4,5742	2,5478	0,0976	0,0543
545	56,1	1,7561	0,9851	4,7852	2,6844	0,0654	0,0366
550	56,3	2,1414	1,2056	4,9156	2,7672	0,0433	0,0243
555	56,6	2,5409	1,4381	4,9636	2,8093	0,0286	0,0161
560	56,7	2,9397	1,6668	4,9203	2,7898	0,0191	0,0108
565	56,8	3,3161	1,8835	4,7847	2,7177	0,0131	0,0074
570	56,9	3,6616	2,0834	4,5736	2,6023	0,0099	0,0056
575	56,9	3,9624	2,2546	4,3052	2,4496	0,0081	0,0046
580	56,9	4,2081	2,3944	3,9958	2,2736	0,0070	0,0039
585	56,9	4,3853	2,4952	3,6580	2,0814	0,0061	0,0034
590	56,9	4,4932	2,5566	3,3132	1,8852	0,0051	0,0029
595	56,9	4,5261	2,5753	2,9770	1,6939	0,0041	0,0023
600	56,9	4,4735	2,5454	2,6580	1,5124	0,0032	0,0018
605	56,9	4,3605	2,4811	2,3642	1,3452	0,0023	0,0013
610	56,9	4,1632	2,3688	2,0881	1,1881	0,0015	0,0009
615	56,9	3,8875	2,2119	1,8275	1,0398	0,0011	0,0006
620	56,9	3,5351	2,0114	1,5763	0,8969	0,0008	0,0004
625	56,9	3,1076	1,7682	1,3275	0,7553	0,0006	0,0003
630	56,9	2,6549	1,5106	1,0952	0,6231	0,0004	0,0002
635	56,9	2,2357	1,2721	0,8954	0,5094	0,0002	0,0001
640	56,9	1,8466	1,0507	0,7216	0,4105	0,0001	0,0000
645	56,9	1,4912	0,8484	0,5713	0,3250		
650	56,9	1,1744	0,6682	0,4432	0,2521		
655	56,9	0,9056	0,5152	0,3378	0,1922		
660	56,9	0,6808	0,3873	0,2518	0,1432		
665	56,9	0,4963	0,2823	0,1825	0,1038		
670	56,9	0,3542	0,2015	0,1297	0,0737		
675	56,9	0,2552	0,1452	0,0931	0,0529		
680	56,9	0,1845	0,1049	0,0671	0,0381		

Tableau XV (C)

Calcul des tristimuli en utilisant les coefficients de distribution de la lumière C et les facteurs de réflexion diffuse

λ	$\rho_\lambda \times 100$	$\bar{x}_c$	$\bar{x}$	$\bar{y}_c$	$\bar{y}$	$\bar{z}_c$	$\bar{z}$
685	56,9	0,1269	0,0722	0,0460	0,0261		
690	56,9	0,0854	0,0485	0,0309	0,0175		
695	56,9	0,0582	0,0331	0,0210	0,0119		
700	56,9	0,0407	0,0231	0,0147	0,0083		
705	56,9	0,0281	0,0159	0,0101	0,0057		
710	56,9	0,0198	0,0112	0,0071	0,0040		
715	56,9	0,0136	0,0077	0,0049	0,0027		
720	56,9	0,0093	0,0052	0,0034	0,0019		
725	56,9	0,0063	0,0035	0,0023	0,0013		
730	56,9	0,0044	0,0025	0,0016	0,0009		
735	56,9	0,0030	0,0017	0,0011	0,0006		
740	56,9	0,0020	0,0011	0,0007	0,0004		
745	56,9	0,0014	0,0007	0,0005	0,0002		
750	56,9	0,0009	0,0005	0,0003	0,0002		
755	56,9	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001		
760	56,9	0,0005	0,0002	0,0001	0,0000		
765	56,9	0,0003	0,0001	0,0001	0,0000		
770	56,9	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000		

$$\Sigma \bar{x} = X = 53,8089$$

$$\Sigma \bar{y} = Y = 55,5615$$

$$\Sigma \bar{z} = Z = 56,6732$$

$$X + Y + Z = 166,0436$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{53,8089}{166,0436} = 0,3240$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{55,5615}{166,0436} = 0,3346$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{56,6732}{166,0436} = 0,3413$$

Tableau XVI

Calcul des tristimuli par les ordonnées sélectionnées pour la lumière C en utilisant 30 et 10 ordonnées

X	$\rho_\lambda \times 100$	Y	$\rho_\lambda \times 100$	Z	$\rho_\lambda \times 100$
424,4	46,0	465,9	49,1	414,1	45,9
. 435,5	46,5	. 489,4	50,9	. 422,2	46,0
443,9	46,8	500,4	52,0	426,3	46,1
452,1	47,5	508,7	53,0	429,4	46,2
. 461,2	48,9	. 515,1	53,6	. 432,0	46,3
474,0	49,5	520,6	54,1	434,3	46,4
531,2	55,1	525,4	54,6	436,5	46,5
. 544,3	56,1	. 529,8	55,0	. 438,6	46,6
552,4	56,4	533,9	55,3	440,6	46,6
558,7	56,6	537,7	55,6	442,5	46,7
. 564,1	56,8	. 541,4	55,9	. 444,4	46,9
568,9	56,9	544,9	56,1	446,3	46,9
573,2	56,9	548,4	56,2	448,2	47,1
. 577,3	56,9	. 551,8	56,4	. 450,1	47,3
581,3	56,9	555,1	56,5	452,1	47,5
585,0	56,9	558,5	56,6	454,0	47,7
. 588,7	56,9	. 561,9	56,8	. 455,9	47,9
592,4	56,9	565,3	56,9	457,9	48,0
596,0	56,9	568,9	56,9	459,9	48,2
. 599,6	56,9	. 572,5	56,9	. 462,0	48,4
603,3	56,9	576,4	56,9	464,1	48,6
607,0	56,9	580,5	56,9	466,3	48,8
. 610,9	56,9	. 584,8	56,9	. 468,7	49,0
615,0	56,9	589,6	56,9	471,4	49,2
619,6	56,9	594,8	56,9	474,3	49,5
. 624,2	56,9	. 600,8	56,9	. 477,7	49,9
629,8	56,9	607,7	56,9	481,8	50,1
636,6	56,9	616,1	56,9	487,2	50,3
. 645,9	56,9	. 627,3	56,9	. 495,2	51,5
663,0	56,9	647,4	56,9	511,2	53,2

Les 10 ordonnées sélectionnées sont repérées par un astérisque.

Calcul par les 30 ordonnées :

Totaux respectifs divisés par 100 $X_{30} = \frac{1.646,7}{100}$ $Y_{30} = \frac{1.667,4}{100}$ $Z_{30} = \frac{1.439,4}{100}$

Facteurs K_{30} correspondants 3,268 3,333 3,938

Produits X = 53,841 Y = 55,574 Z = 56,679

$X + Y + Z = 166,094$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{53,841}{166,094} = 0,3241$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{55,574}{166,094} = 0,3346$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{56,679}{166,094} = 0,3412$$

Calcul par les 10 ordonnées :

Totaux respectifs divisés par 100 $X_{10} = \frac{549,1}{100}$ $Y_{10} = \frac{556,1}{100}$ $Z_{10} = \frac{479,8}{100}$

Facteurs K_{10} correspondants 9,805 10,000 11,813

Produits X = 53,839 Y = 55,610 Z = 56,678

$X + Y + Z = 166,127$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{53,839}{166,127} = 0,3240$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{55,610}{166,127} = 0,3347$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{56,678}{166,127} = 0,3411$$

Le calcul des coordonnées trichromatiques, tel qu'il vient d'être exécuté en utilisant trois voies différentes, montre une fois encore l'intérêt que l'on trouve à utiliser 10 ordonnées sélectionnées seulement . En principe, la variation constatée n'intéresse que la quatrième décimale, alors que les difficultés du calcul sont réduites de façon très importante .

En effet, la multiplication de chaque coefficient de distribution par le facteur de réflexion diffuse correspondant, suivi de la sommation de tous les résultats, ne va pas sans de gros risques d'erreurs qui peuvent être alors plus grands que la différence constatée sur la quatrième décimale .

Il ne faut pas non plus accorder une importance capitale aux variations que l'on peut constater entre ces différentes méthodes de calcul mais plutôt s'émerveiller d'une différence aussi faible . Si l'on ajoute à celà que des variations de plusieurs unités de la quatrième décimale restent inférieures à la valeur du seuil de perception différentielle, on conviendra qu'il est inutile de rechercher là une précision qui n'a plus de signification .

On peut donc opter pour les résultats obtenus par la méthode la plus simple et à partir de ceux-ci effectuer les calculs subsidiaires qui doivent nous permettre de préciser les valeurs complémentaires indispensables à l'expression correcte de la teinte de la dent étudiée .

Pour figurer le point relatif aux coordonnées trichromatiques ainsi déterminées, on utilise une portion très agrandie du triangle chromatique sur laquelle on reporte les abscisses et les ordonnées correspondantes . A partir de cette représentation, il est alors facile d'obtenir la longueur d'onde dominante et la pureté d'excitation soit de façon approximative par une méthode graphique ou plus précisément par le calcul .

Les résultats $x = 0,3240$ $y = 0,3347$ figurent dans les tableaux déjà cités, z se déduisant par la différence à 1 de leur somme puisque $x + y + z = 1$.

Il est alors possible de situer la couleur apparente de la dent étudiée lorsqu'elle est observée en lumière C dans le triangle chromatique et la figurer par un point dont les coordonnées x et y sont celles qui viennent d'être déterminées .

Pour ne pas perdre le bénéfice de la précision donnée par le calcul qui nous donne la quatrième décimale, nous sommes amené à agrandir la région correspondante du diagramme, comme nous le verrons ultérieurement .

La couleur étant représentée par le point N (x = 0, 3240 et y = 3347), il nous reste maintenant à déterminer sa réflectance, sa longueur d'onde dominante et sa pureté d'excitation .

4°- Détermination de la réflectance ou facteur intégral de luminance .

Le stimulus Y correspondant, par définition , à une fonction de distribution identique à la courbe de visibilité relative, celle-ci est donnée directement par la valeur de Y du tableau, soit dans l'exemple choisi Y = 56 % qui représente, par conséquent, la réflectance .

5°- Détermination de la longueur d'onde dominante .

Pour obtenir la longueur d'onde dominante, il suffit de joindre le point de la lumière blanche de référence au point correspondant à la teinte et prolonger la droite obtenue jusqu'à son intersection avec le lieu spectral .

Cette façon de procéder est rapide, mais imprécise, à moins d'opérer sur un système graphique considérablement agrandi et encombrant .

Il est beaucoup plus juste de déterminer, dans un premier temps, le point d'intersection de la droite avec le lieu spectral par un simple calcul d'analyse élémentaire . Celui-ci , définit avec précision la longueur d'onde dominante par interpolation si nécessaire .

Le lieu spectral dans la région qui correspond à la dominante cherchée est sensiblement rectiligne et peut être assimilé à une droite entre 570 - 575 et 580 mμ .

Les coordonnées correspondant à ces points sont :

pour 500 mμ x = 0, 4441 y = 0, 5547

pour 575 mμ x = 0, 4788 y = 0, 5202

pour 580 mμ x = 0, 5125 y = 0, 4866

Le problème est donc de déterminer les coordonnées du point d'intersection de deux droites . L'équation analytique de celles-ci étant de la forme $y = ax = b$, il suffit de faire entrer dans cette expression les données que nous possédons :

a) Equation de la droite figurant le lieu spectral entre 570 et 575 mμ nous obtenons pour le lieu spectral :

au point 570 mμ x = 0, 4441 y = 0, 5547

soit l'équation correspondante : 0, 5547 = a. 0, 4441 = b

au point 575 mμ x = 0, 4688 y = 0, 5202

on peut écrire de même : 0, 5202 = a. 0, 4788 = b

La résolution de ces deux équations à deux inconnues nous donne par soustraction membre à membre :

$$0,5547 = a.\ 0,4441 + b$$

$$0,5202 = a.\ 0,4788 + b$$

$$0,0345 = a.\ (-\ 0,0347)$$

d'où : $$a = \frac{-\ 0,0345}{0,0347} = -\ 0,9942$$

Si nous reportons cette valeur de "a" dans l'une des équations initiales, nous en tirons la valeur de b, soit :

$$0,5547 = -\ (0,9942.\ 0,4441) + b$$

d'où : $$b = 0,5547 + 0,4415 = 0,9962$$

ce qui nous donne donc pour le lieu spectral dans cette région, la relation suivante :

$$\boxed{y = -0,9942\,x + 0,9962} \qquad (1)$$

b) Equation de la droite joignant le blanc de référence au point N correspondant à la couleur . Les coordonnées du blanc de référence étant = x = 0, 3101 et y = 0, 3163, celles de la couleur x = 0, 3240 et y = 0, 3347 , nous pouvons poser de la même façon :

$$0,3163 = a \,.\, 0,3101 + b$$

$$\text{et} \quad 0,3347 = a \,.\, 0,3240 + b$$

qui par soustraction membre à membre nous donne :

$$0,0184 = a \,.\, 0,0139$$

d'où

$$a = \frac{0,0184}{-0,0139} = 1,3237$$

résultat que l'on reporte comme précédemment dans l'une des deux équations pour obtenir :

$$0,3163 = 1,3237 \,.\, 0,3101 + b$$

$$b = 0,3163 - (0,3101 \,.\, 1,3237) = 0,3163 - 0,4101 = -0,0941$$

ce qui donne pour la droite joignant le blanc de référence à la couleur la relation :

$$\boxed{y = 1,327\,x - 0,0941} \qquad (2)$$

c) Le point d'intersection de la droite C N et du lieu spectral, correspond à l'égalité des coordonnées de chacune de ces deux droites, on peut donc égaler les deuxièmes membres de chacune des équations 1 et 2 :

$$1,3237\,x - 0,0941 = -0,9942\,x + 0,9962$$

$$1,3237\,x + 0,9942\,x = 0,9962 + 0,0941$$

$$2,3179\,x = 1,0903$$

$$x = \frac{1,0903}{2,3179} = 0,4704$$

Et en portant cette valeur de x dans une des équations 1 ou 2 précédentes, on en déduit y , ce qui nous donne comme coordonnée de la couleur dominante :

x = 0,4704
y = 0,5285

Par interpolation on obtient alors , directement, la longueur d'onde de la couleur dominante .

Nous avons, en effet, pour les longueurs d'onde du lieu spectral 570 mμ qui a pour abscisse x = 0,4441

et 575 mμ qui a pour abscisse x = 0,4788

soit 0,0347 de différence pour 5 mμ .

Le point correspondant à la dominante cherchée partage le segment 570 - 575 dans le rapport :

$$\frac{0,4788 - 0,4704}{0,4788 - 0,4441} = \frac{0,0084}{0,0347} = 0,2420$$

Il partage de même les 5 mμ entre 570 et 575 c'est-à-dire qu'il se situe à 5 . 0,2420 = 1,21 mμ en partant de 575 mμ . Ce qui nous donne :

575 - 1,21 = 573,79 5738 Å 574 mμ

La longueur d'onde dominante de la dent correspondant au point N est donc :

574 mμ

6°- Détermination de la pureté d'excitation.

Si nous reprenons les coordonnées du point d'intersection de la droite C N avec le lieu spectral soit x = 0, 4704 et y = 0, 5285 qui sont les coordonnées de la longueur d'onde dominante λ de la couleur figurée par le point N lorsque la dent est observée en lumière C .

La pureté d'excitation s'en déduit par définition en faisant le rapport des segments $\frac{CN}{C_\lambda}$ que l'on peut exprimer en utilisant les coordonnées de leurs origines et de leurs extrémités .

Pour C : x = 0, 3101 y = 0, 3163

et pour N : x = 0, 3240 y = 0, 3347

Comme nous sommes géométriquement dans un système de droites concourantes coupées par des parallèles, il y a proportionnalité entre les segments découpés et l'on peut écrire :

$$\frac{0,3240 - 0,3101}{0,4704 - 0,3101} = \frac{0,3347 - 0,3163}{0,5285 - 0,3163} = 0,0867$$

La pureté d'excitation est donc :

8, 7 %

La teinte de la dent qui a fait l'objet de ce développement est caractérisée par :

- coordonnées trichromatiques x = 0, 3240 ; y = 0, 3347
- longueur d'onde dominante = 574 mμ
- pureté d'excitation = 8, 7 %
- réflectance ou facteur intégral de luminance Y = 56 %

EVALUATION DES ECARTS DE PERCEPTION

Nous nous trouvons dans une région très éloignée du lieu spectral et beaucoup plus proche de la lumière blanche de référence . Le seuil différentiel est moins étroit qu'au niveau du spectrum locus .

Si l'on établit en effet, les seuils de perception dans le cas des couleurs pures, on constate qu'aux deux extrémités l'intervalle de longueur d'onde est assez important mais qu'il devient beaucoup plus étroit vers le milieu du spectre, présentant deux minima, l'un à 490, l'autre à 590 mμ , où deux radiations séparées de 1 mμ , peuvent donner lieu à deux perceptions différentes, ce qui aboutit, en moyenne, à environ 250 nuances discernables le long du spectre .

Au fur et à mesure que la pureté diminue, le seuil différentiel augmente et doit être multiplié par quatre environ pour les puretés de l'ordre de celles que nous constatons pour les dents . Le pas passe alors de 1 mμ environ à 4 mμ ce qui restreint le nombre de teintes dominantes discernables pour les dents naturelles .

Les différences perçues sont dues, par conséquent, le plus souvent, bien plus à la variation de l'albédo qu'à celle de la dominante.

SEUIL DIFFERENTIEL DE PURETE

Si l'on recherche maintenant le seuil de pureté minimum susceptible d'être déterminé ou la quantité minima de couleur à ajouter au blanc pour que la teinte devienne perceptible, on voit, précisément pour les couleurs dont les longueurs d'ondes correspondent à la teinte des dents que la sensibilité est la plus faible . Il faut, en effet, un accroissement d'environ 0, 05 de la pureté colorimétrique, ce qui correspond à 3 % de la pureté d'excitation (pe = 3 %) dans cette région pour y parvenir, alors qu'un accroissement de 0, 001 est perceptible aux extrémités du spectre .

La pureté maxima que nous ayons pu constater sur des dents normales étant inférieure à 15 %, on peut donc prévoir 3 ou 4 pas perceptibles de pureté .

EVOLUTION DES ATTRIBUTS PSYCHOLOGIQUES DE LA COULEUR EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT ET DE LA LEUCIE

Nous nous sommes placé dans le courant de cette étude dans des conditions d'éclairement moyennes comme nous l'avons dit au début pour simplifier le problème . Il y a , cependant, un phénomène physiologique dont il faut tenir compte dans certaines conditions qui provoque une modification des stimuli et se traduit par un déplacement dans le spectre de la couleur perçue en fonction du niveau d'éclairement .

L'accroissement du niveau lumineux produit un glissement de la sensation colorée vers le jaune ou vers le bleu suivant le cas . Ces deux couleurs paraissent être les points fixes vers lesquels tendent les autres couleurs , le vert séparant les deux régions d'évolution contraire . Le phénomène de BEZOLD-BRUCKE montre donc que l'accroissement des luminances n'est pas nécessairement favorable à une meilleure vision des couleurs .

Les points de convergence ont été situés par PURDY à 571 mμ pour le jaune, 474 mμ pour le bleu, le vert limite se trouvant à 506 mμ .

Bien que la couleur des dents soit proche de la ligne de convergence, ce n'est pas, en élevant le niveau de l'éclairement que l'on peut penser arriver à une meilleure discrimination de leur teinte et chacun de nous a déjà eu l'occasion de le constater .

Si la source employée donne une lumière dont la répartition spectrale est pauvre en radiation bleue, comme c'est le cas pour les sources à incandescence, l'incertitude sera encore plus grande .

Les meilleures conditions d'observation dans le cas particulier des dents sont celles qui correspondent à la lumière solaire indirecte dont l'illuminant C est l'équivalent en lumière artificielle et dans ce dernier cas en évitant, par conséquent, de rechercher

des niveaux d'éclairement trop élevés, en opérant sur un fond gris, la lumière parvenant sur les dents à comparer n'étant pas dirigée , mais de préférence diffusée, par réflexion sur une surface concave , de façon à éliminer les reflets qui empêchent une bonne discrimination de la teinte .

Un autre phénomène provoquant, également, un glissement de la couleur dominante du point de vue physiologique est dû à l'albédo. La dominante d'une couleur subit un déplacement vers le jaune d'une part, ou vers le pourpre suivant le cas fonction de la valeur de son coefficient de réflexion diffuse et de façon d'autant plus nette que ce dernier est plus élevé, comme l'ont montré AUBERT, puis NEWHALL, NICK .

Fort heureusement, dans le cas des dents où la dominante est jaune, nous nous trouvons dans la région de la ligne d'égale tonalité qui joint le point C à 572 mμ sur le lieu spectral .

Le phénomène pourrait devenir sensible pour les dents à dominante voisine de 580 mμ à tendance orange, mais étant donné la faible pureté de la teinte, couplée généralement avec une réflectance peu élevée, son influence peut être considérée comme négligeable .

Ces considérations qui, dans notre cas particulier, ne représentent qu'une tendance dans l'évolution de l'attribut psychologique, mettent en évidence les disparités entre les données colorimétriques purement instrumentales et les stimuli correspondants .

On peut traduire simplement les résultats colorimétriques en équivalents psychologiques . Les premiers correspondent à une analyse de l'émission lumineuse directe ou indirecte de la couleur isolée qu'elle provienne d'une source primaire c'est-à-dire directe , ou secondaire, c'est-à-dire indirecte résultant de la réflexion d'une lumière primaire sur un objet . Les secondes dépendent de la surface observée, de la région de l'œil où se forme l'image, du niveau de la source si elle est primaire, de son niveau d'éclairement et du facteur de réflexion diffuse si elle est secondaire .

Ce sont ces variations de l'appréciation psychologique qui plaident en faveur de l'analyse instrumentale qui a au moins le mérite d'être reproductible et permanente . Malheureusement, bien qu'ils soient très sensibles dans certaines régions spectrales, les photomultiplicateurs le sont beaucoup moins dans d'autres et l'on éprouve de grandes difficultés à dépasser la sensibilité de l'organe visuel globalement .

JUDD et KELLY chiffrent, en effet , à 10^7 le nombre de couleurs de surface qu'un observateur exercé peut distinguer .

Mais ces performances baissent très rapidement , dès l'instant où il ne s'agit plus de comparer des couleurs proches sous un même éclairage, mais de définir une teinte isolée à un moment donné, sinon retrouver cette même teinte parmi un certain nombre d'autres au bout d'un temps déterminé .

L'appareil dans ses capacités pourra effectuer ces deux opérations avec infiniment plus de sûreté que l'œil humain, c'est la raison pour laquelle tout en reconnaissant les limites de ces appareillages il faut continuer à les perfectionner de façon à obtenir une sensibilité et une précision égale ou supérieure à celle de l'œil, ce dernier ne pouvant égaler leur fidélité et leur reproductibilité .

C'est leur fiabilité qui doit nous permettre de bien définir certaines teintes qui peuvent, dès lors, être reproduites en quelque lieu ou en quelque temps que ce soit avec la même certitude .

Il est possible d'adapter sur un spectrocolorimètre des cables conducteurs de façon à séparer la tête colorimétrique du corps de l'appareil et travailler in vivo en suivant, par exemple, l'évolution de la teinte des produits d'obturation esthétique en bouche au cours du temps, ou celle des dents artificielles soit pendant leur stockage, soit au cours d'utilisation, évaluer la perte de luminance d'une dent après dévitalisation en fonction des traitements endodontiques pratiqués, apprécier l'évolution de la teinte des dents à la suite de l'ingestion de certains médicaments .

Tels sont entre autres quelques-uns des aspects pratiques de la colorimétrie clinique en dehors des assortiments de teintes ou de reproduction , aussi bien en résine qu'en porcelaine, qui sont des préoccupations purement prothétiques .

Pour cela, on dispose d'une science qui est encore bien jeune, mais dont les bases sont suffisamment bien définies, à l'heure actuelle, pour qu'il soit possible de l'utiliser avec succès, ce que l'on peut faire à condition d'en connaître parfaitement les principes essentiels .

REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS OBTENUS

Si nous reprenons maintenant nos résultats qui correspondent à la traduction des mesures instrumentales, leur signification apparaît plus clairement par l'expression graphique .

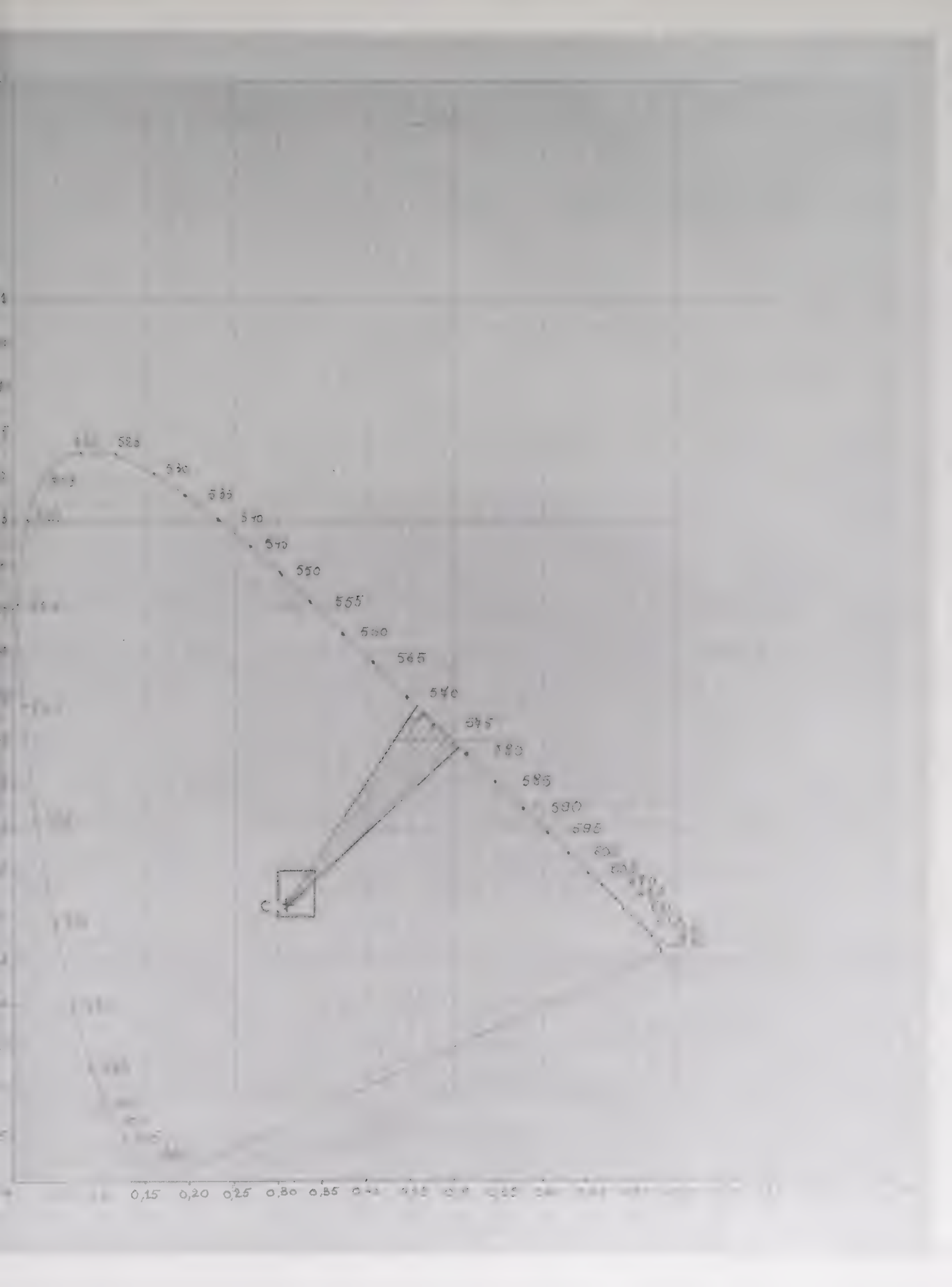
Pour obtenir une plus grande précision, on agrandit considérablement une petite surface du triangle chromatique, comme on le voit sur la figure (XVII) et l'on porte sur ce nouveau graphique les abscisses et les ordonnées correspondantes . De la sorte, il est possible d'arriver à la précision de la quatrième décimale qui est celle des résultats obtenus .

On fait figurer en premier lieu, le point représentatif de la lumière C qui est celui de la source utilisée pour l'observation, puis le point correspondant à la teinte dont les ordonnées viennent d'être déterminées .

La droite qui joint ces deux points coupe le lieu spectral en dehors des limites du graphique au point dont les coordonnées ont été déterminées précédemment et qui est celui de la dominante . On désigne donc la droite par la longueur d'onde de cette dernière .

On inscrit à côté du point figuratif de la teinte la réflectance générale correspondant à Y et la pureté d'excitation . On trouve donc sur ce graphique tous les éléments issus des calculs précédents .

Nous avons rassemblé quelques uns des résultats les plus significatifs dont nous avons groupé les courbes de distribution spectrale des facteurs de réflexion diffuse dans deux figures successives pour éviter une trop grande confusion entre les courbes , chacune d'entre elles est numérotée de 3 à 12 en fonction de la réflectance décroissante .


525
530
535
540
545
550
555
560
565
570
575
580
585
590
595
0,15
0,20
0,25
0,30
0,35

Les pages suivantes sont consacrées au calcul des tristimuli X Y Z, en utilisant la méthode des 10 ordonnées sélectionnées et à celui des coordonnées trichromatiques qui s'en déduisent . Le chiffre correspondant à chaque courbe permet de retrouver la page de calcul qui lui correspond .

Enfin, nous avons fait figurer l'ensemble de tous ces résultats sur un même graphique de façon à pouvoir en tirer quelques enseignements en nous livrant à une analyse globale .

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°3

λx_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	57,5	489,4	62,2	422,20	56,2
461,2	60,0	515,1	63,0	432,0	57,0
544,3	63,5	529,8	63,2	438,6	57,7
564,1	64,0	541,4	63,3	444,4	58,2
577,3	64,0	551,8	63,5	450,1	58,8
588,7	64,0	561,9	63,8	455,9	59,3
599,6	64,0	572,5	64,0	462,0	60,0
610,9	64,0	584,8	64,0	468,7	60,8
624,2	64,0	600,8	64,0	477,7	61,5
645,9	64,0	627,3	64,0	495,2	62,5
	629,0		635,0		592,0
$\Sigma \rho_\lambda = 6,29$		$\Sigma \rho_\lambda = 6,35$		$\Sigma \rho_\lambda = 5,92$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 6,290 \times 9,805 = 61,67$		$Y = 6,350 \times 10 = 63,50$		$Z = 5,920 \times 11,813 = 69,93$	

$$X + Y + Z = 195,10$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{61,67}{195,10} = 0,3160$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{63,50}{195,10} = 0,3254$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°4

$\lambda x_{c\ 10}$	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	59,2	489,4	61,1	422,2	58,6
461,2	60,3	515,1	61,5	432,0	59,0
544,3	61,7	529,8	61,6	438,6	59,5
564,1	61,7	541,4	61,7	444,4	59,8
577,3	61,7	551,8	61,7	450,1	60,0
588,7	61,7	561,9	61,7	455,9	60,1
599,6	61,7	572,5	61,7	462,0	60,3
610,9	61,7	584,8	61,7	468,7	60,5
624,2	61,7	600,8	61,7	477,7	60,6
645,9	61,7	627,3	61,7	495,2	61,2
	613,1		616,1		599,6
$\Sigma \rho_\lambda = 6,131$		$\Sigma \rho_\lambda = 6,161$		$\Sigma \rho_\lambda = 5,996$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 6,131 \times 9,805 = 60,11$		$Y = 6,161 \times 10 = 61,61$		$Z = 5,996 \times 11,813 = 70,83$	

$$X + Y + Z = 192,55$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{60,11}{192,55} = 0,3121$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{61,61}{192,55} = 0,3199$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°5

λx_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	51,6	489,4	54,8	422,2	51,2
461,2	52,9	515,1	56,5	432,0	51,5
544,3	57,7	529,8	57,2	438,6	51,8
564,1	58,0	541,4	57,6	444,4	52,0
577,3	58,0	551,8	57,8	450,1	52,3
588,7	58,0	561,9	58,0	455,9	52,6
599,6	58,0	572,5	58,0	462,0	52,9
610,9	58,0	584,8	58,0	468,7	53,4
624,2	58,0	600,8	58,0	477,7	54,0
645,9	58,0	627,3	58,0	495,2	55,2
	568,2		573,9		526,9
$\Sigma \rho_\lambda = 5,682$		$\Sigma \rho_\lambda = 5,739$		$\Sigma \rho_\lambda = 5,269$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 5,682 \times 9,805 = 55,71$		$Y = 5,739 \times 10 = 57,39$		$Z = 5,269 \times 11,813 = 62,24$	

$$X + Y + Z = 175,34$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{65,71}{175,34} = 0,3177$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{57,39}{175,34} = 0,3272$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°6

λx_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	44,9	489,4	49,0	422,2	44,7
461,2	46,2	515,1	51,8	432,0	44,8
544,3	54,6	529,8	53,4	438,6	45,0
564,1	55,4	541,4	54,4	444,4	45,1
577,3	55,4	551,8	55,1	450,1	45,4
588,7	55,4	561,9	55,4	455,9	45,8
599,6	55,4	572,5	55,4	462,0	46,3
610,9	55,4	584,8	55,4	468,7	47,0
624,2	55,4	600,8	55,4	477,7	47,8
645,9	55,4	627,3	55,4	495,2	49,6
	533,5		540,7		461,5
$\Sigma \rho_\lambda = 5,335$		$\Sigma \rho_\lambda = 5,407$		$\Sigma \rho_\lambda = 4,615$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 5,335 \times 9,805 = 52,31$		$Y = 5,407 \times 10 = 54,07$		$Z = 4,615 \times 11,813 = 54,51$	

$$X + Y + Z = 160,89$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{52,31}{160,89} = 0,3251$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{54,07}{160,89} = 0,3360$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°7

λx_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	45,0	489,4	50,2	422,2	44,2
461,2	47,5	515,1	52,0	432,0	45,0
544,3	53,5	529,8	52,8	438,6	45,5
564,1	53,8	541,4	53,2	444,4	46,0
577,3	54,2	551,8	53,6	450,1	46,5
588,7	54,5	561,9	53,8	455,9	47,0
599,6	54,5	572,5	54,1	462,0	47,5
610,9	54,5	584,8	54,4	468,7	48,3
624,2	54,5	600,8	54,5	477,7	49,2
645,9	54,5	627,3	54,5	495,2	50,8
	526,5		533,1		470,00
$\Sigma \rho_\lambda = 5,265$		$\Sigma \rho_\lambda = 5,331$		$\Sigma \rho_\lambda = 4,700$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 5,265 \times 9,805 = 51,62$		$Y = 5,331 \times 10 = 53,31$		$Z = 4,700 \times 11,813 = 55,52$	

$$X + Y + Z = 160,45$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{51,62}{160,45} = 0,3217$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{53,31}{160,45} = 0,3321$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°8

$\lambda x_{c\,10}$	$\rho_\lambda \times 100$	$\lambda y_{c\,10}$	$\rho_\lambda \times 100$	$\lambda z_{c\,10}$	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	38,8	489,4	40,5	422,2	38,6
461,2	39,4	515,1	42,6	432,0	38,8
544,3	44,6	529,8	43,9	438,6	38,9
564,1	45,0	541,4	44,5	444,4	39,0
577,3	45,0	551,8	44,8	450,1	39,1
588,7	45,0	561,9	45,0	455,9	39,2
599,6	45,0	572,5	45,0	462,0	39,4
610,9	45,0	584,5	45,0	468,7	39,8
624,2	45,0	600,8	45,0	477,7	40,0
645,9	45,0	627,3	45,0	495,2	41,0
	437,8		441,3		393,8
$\Sigma \rho_\lambda = 4,378$		$\Sigma \rho_\lambda = 4,413$		$\Sigma \rho_\lambda = 3,938$	
$k_{x\,10} = 9,805$		$k_{y\,10} = 10$		$k_{z\,10} = 11,813$	
$X = 4,378 \times 9,805 = 42,92$		$Y = 4,413 \times 10 = 44,13$		$Z = 3,938 \times 11,813 = 46,52$	

$$X + Y + Z = 133,57$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{42,92}{133,57} = 0,3213$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{44,13}{133,57} = 0,3303$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°9

λx_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	34,2	489,4	36,9	422,2	33,8
461,2	35,4	515,1	39,3	432,0	34,1
544,3	41,0	529,8	40,3	438,6	34,4
564,1	41,6	541,4	40,9	444,4	34,6
577,3	41,8	551,8	41,3	450,1	34,8
588,7	41,8	561,9	41,6	455,9	35,1
599,6	41,8	572,5	41,7	462,0	35,4
610,9	41,8	584,8	41,8	468,7	36,1
624,2	41,8	600,8	41,8	477,7	36,8
645,9	41,8	627,3	41,8	495,2	37,4
	403,0		407,4		352,5
$\Sigma \rho_\lambda = 4,030$		$\Sigma \rho_\lambda = 4,074$		$\Sigma \rho_\lambda = 3,525$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 4,030 \times 9,805 = 39,51$		$Y = 4,074 \times 10 = 40,74$		$Z = 3,525 \times 11,813 = 41,64$	

$$X + Y + Z = 121,89$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{39,51}{121,89} = 0,3241$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{40,74}{121,89} = 0,3342$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°10

λx_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	31,4	489,4	33,5	422,2	31,1
461,2	32,4	515,1	35,5	432,0	31,3
544,3	37,7	529,8	36,9	438,6	31,5
564,1	38,2	541,4	37,6	444,4	31,7
577,3	38,2	551,8	38,0	450,1	31,9
588,7	38,2	561,9	38,2	455,9	32,1
599,6	38,2	572,5	38,2	462,0	32,4
610,9	38,2	584,8	38,2	468,7	32,6
624,2	38,2	600,8	38,2	477,7	32,9
645,9	38,2	627,3	38,2	495,2	33,8
	368,9		372,5		321,3
$\Sigma \rho_\lambda = 3,689$		$\Sigma \rho_\lambda = 3,725$		$\Sigma \rho_\lambda = 3,213$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 3,689 \times 9,805 = 36,17$		$Y = 3,725 \times 10 = 37,25$		$Z = 3,213 \times 11,813 = 37,95$	

$$X + Y + Z = 111,37$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{36,17}{111,37} = 0,3247$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{37,25}{111,37} = 0,3344$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°11

λx_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λy_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$	λz_{c10}	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	29,7	489,4	31,2	422,2	29,6
461,2	30,5	515,1	32,4	432,0	29,8
544,3	34,8	529,8	33,6	438,6	29,9
564,1	36,0	541,4	34,6	444,4	30,0
577,3	36,6	551,8	35,4	450,1	30,2
588,7	36,8	561,9	35,8	455,9	30,4
599,6	36,8	572,5	36,4	462,0	30,5
610,9	36,8	584,8	36,8	468,7	30,7
624,2	36,8	600,8	36,8	477,7	30,9
645,9	36,8	627,3	36,8	495,2	31,5
	351,6		349,8		303,5
$\Sigma \rho_\lambda = 3,516$		$\Sigma \rho_\lambda = 3,498$		$\Sigma \rho_\lambda = 3,035$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 3,516 \times 9,805 = 34,47$		$Y = 3,498 \times 10 = 34,98$		$Z = 3,035 \times 11,813 = 35,85$	

$$X + Y + Z = 105,30$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{34,47}{105,30} = 0,3273$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{34,98}{105,30} = 0,3321$$

Calculs relatifs à la teinte de la dent n°12

$\lambda x_{c\ 10}$	$\rho_\lambda \times 100$	$\lambda y_{c\ 10}$	$\rho_\lambda \times 100$	$\lambda z_{c\ 10}$	$\rho_\lambda \times 100$
435,5	29,1	489,4	29,8	422,2	29,0
461,2	29,3	515,1	30,4	432,0	29,1
544,3	32,3	529,8	31,2	438,6	29,1
564,1	33,2	541,4	32,1	444,4	29,2
577,3	33,3	551,8	32,7	450,1	29,2
588,7	33,3	561,9	33,2	455,9	29,3
599,6	33,3	572,5	33,3	462,0	29,3
610,9	33,3	584,8	33,3	468,7	29,4
624,2	33,3	600,8	33,3	477,7	29,5
645,9	33,3	627,3	33,3	495,2	29,8
	323,7		322,6		292,9
$\Sigma \rho_\lambda = 3,237$		$\Sigma \rho_\lambda = 3,226$		$\Sigma \rho_\lambda = 2,929$	
$k_{x\ 10} = 9,805$		$k_{y\ 10} = 10$		$k_{z\ 10} = 11,813$	
$X = 3,237 \times 9,805 = 31,73$		$Y = 3,226 \times 10 = 32,26$		$Z = 2,929 \times 11,813 = 34,60$	

$$X + Y + Z = 98,59$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{31,73}{98,59} = 0,3218$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{32,60}{98,59} = 0,3271$$

ANALYSE GLOBALE DES RESULTATS OBTENUS

Nous avons défini une géométrie de mesure qui nous a permis d'obtenir des valeurs acceptables . Les chiffres obtenus correspondent aux impressions effectivement ressenties .

Nous avons démontré, dans le cadre particulier qui nous occupe, que les tristimuli calculés longueur d'onde par longueur d'onde, étaient identiques à ceux obtenus en utilisant les ordonnées sélectionnées , ceci à une unité de la quatrième décimale près . Dans ce dernier cas, nous avons vu que les résultats obtenus avec 10 ordonnées étaient sensiblement égaux à ceux correspondant à 30 ordonnées.

Par la suite, nous avons effectué nos enregistrements en utilisant des dents de teintes différentes offrant un éventail de tonalités représentatif de la moyenne de celles des dents rencontrées .

Après avoir calculé pour chacune d'entre elles la répartition des coefficients de réflexion diffuse tout au long du spectre, nous avons établi leurs coordonnées trichromatiques à partir de 10 ordonnées sélectionnées seulement .

Les points représentatifs ont été rapportés sur un élément du triangle chromatique allant de 0, 3000 à 0, 3400 en abscisse et de 0, 3000 à 0, 3500 en ordonnée sur lequel figure le point correspondant à la lumière étalon (Figure 20) .

Les droites déterminant les couleurs dominantes y ont été tracées allant de la lumière C vers le lieu spectral .

Nous avons porté entre parenthèses à côté des différents points chromatiques la réflectance correspondante et indiqué les puretés d'excitation en traçant des parallèles au lieu spectral .

Chaque échantillon se trouve ainsi caractérisé par ses coordonnées chromatiques, par sa dominante, par sa pureté d'excitation , par sa réflectance . Nous pensons ainsi avoir donné avec suffisamment de clarté les éléments nécessaires à une définition précise des teintes dentaires .

Pour pouvoir juger de la précision de la détermination instrumentale comparativement à l'évaluation subjective, on peut se reporter aux ellipses de MAC ADAM qui représentent les écarts minima de perceptions différentielles d'une valeur de la pureté à une autre et d'une tonalité à une autre .

En considérant cet ensemble de résultats, nous sommes amené à faire les constatations suivantes :

1°- Les réflectances varient de 35 à 65 % environ .

2°- Il n'y a pas de variations rapides des facteurs de réflexion diffuse tout au long du spectre .

3°- L'absorption a lieu presque uniquement dans le bleu .

4°- Les dents à réflectance élevée de l'ordre de 60 apparaissent blanches, très claires, peu colorées, de couleur dominant voisine de 570 m µ , leur pureté d'excitation est inférieure à 5 % .

5°- Les dents à réflectance moyenne voisine de 50 sont les plus fréquentes, leur pureté d'excitation est souvent supérieure à 5 %, leur saturation est donc plus élevée .

6°- Les dents à réflectance basse 35 à 40 ont des puretés d'excitation très diverses suivant qu'elles sont à tendance grise ou jaune . Les premières ont des puretés d'excitation faibles, c'est avant tout leurs leucies peu élevées que l'on perçoit ; les secondes, ont des puretés d'excitation plus fortes, mais dans ce cas, la dominante est proche de 580 mµ . Ces remarques peuvent s'expliquer par le fait que la dentine jeune est de teinte jaune verdâtre, donc plus proche de 570 m µ que la dentine âgée qui tend vers le jaune orangé voisin de 580 m µ , tandis que la réflectance générale diminue .

7°- La leucie est dans l'ordre de perception celle qui est ressentie en premier, puis la pureté et en dernier lieu seulement la tonalité . La notion de gris est directement liée à celle de la leucie, elle est indépendante de la tonalité .

On peut trouver dans le triangle chromatique des teintes figurées par un même point de tonalité mais ayant des leucies inégales celle qui est affectée de la réflectance la plus basse, dont la leucie est la plus faible par conséquent, est perçue beaucoup plus foncée donc, nettement différente .

Il est donc possible, en fonction des considérations précédentes, de ramener l'ensemble des leucies, des puretés et des tonalités dentaires à un nombre relativement restreint en tenant compte des seuils de perception .

ETUDE DE LA FLUORESCENCE DES DENTS

La fluorescence des dents a été observée depuis longtemps par les chercheurs qui utilisaient des générateurs d'ultraviolets , BENEDICTS aux environs de 1930 publia sur ce sujet, par la suite , EISENBERG, HARTLES, DICKSON , J. de MENT, HALL en particulier, ont étudié ce phénomène dans ses manifestations pathologiques en essayant d'établir une relation entre la fluorescence et la carie ou les maladies générales .

Pour notre part, il était intéressant de déterminer la dominante résultant de ce phénomène et de voir dans quelle mesure la teinte des dents pouvait être modifiée . Cette expérimentation a d'ailleurs fait l'objet d'une communication au Congrès d'Odonto-Stomatologie tenu à Marseille en 1968 .

En se plaçant du simple point de vue qualitatif, nous avons sélectionné une série de dents antérieures naturelles que nous avons placées au-dessus d'un assortiment d'incisives prothétiques de même couleur à la lumière artificielle .

Les dents de remplacement, aussi bien en résine qu'en porcelaine, avaient été sélectionnées en raison des écarts de fluorescence qu'elles présentaient par ailleurs .

Si l'on compare les deux échantillonnages dans les conditions normales d'éclairage, on constate le peu de différence de teinte entres les unes et les autres .

Si l'on éclaire, maintenant l'ensemble avec une lampe à vapeur de mercure dont l'émission est filtrée par un verre de WOOD, ce qui donne un rayonnement qui convient particulièrement bien à l'excitation de la fluorescence, on voit que cette dernière est de couleur bleue pour les dents naturelles, d'intensité sensiblement égale variant très peu d'une dent à l'autre .

Dans l'échantillonnage de dents artificielles, on constate tout d'abord que la plupart d'entre elles ne fluorescent pas exactement comme les dents naturelles, certaines ne donnent lieu à aucune émission alors que d'autres en ont une beaucoup trop intense, d'une couleur absolument différente de celle des dents naturelles .

Or, pour éviter les variations de teinte en fonction de la nature de l'éclairage, il est indispensable que les phénomènes soient identiques, aussi bien en qualité qu'en intensité . Nous pouvons mettre en évidence les variations produites en éclairant notre double échantillonnage de dents naturelles et artificielles par une lumière actinique comportant une fraction importante d'ultraviolets . On peut constater les différences introduites par la fluorescence , qui sont d'autant plus grandes que la quantité d'U. V. dans la lumière incidente est également plus importante .

Les modifications de teintes mises en évidence de façon qualitative, nous avons voulu préciser nos observations sur la fluorescence et procéder à des enregistrements .

A - ETUDE DE LA FLUORESCENCE DES DENTS NATURELLES ET ARTIFICIELLES AU MOYEN D'UN SPECTROGRAPHE A PRISME

C'est le premier montage que nous avons utilisé . Nous l'avions destiné, initialement, à l'analyse spectrographique des luminances . Un disque tournant, découpé suivant des secteurs en progression logarithmique, donnait dix échelons de luminance à partir d'un bloc de carbonate de magnésie diffusant . La dent, située immédiatement au-dessus, devait permettre de comparer les luminances pour chaque longueur d'onde à l'un des dix échelons réalisé artificiellement par la rotation du disque .

La lumière provenant de la dent aussi bien que celle issue des dix échelons de magnésie après dispersion par le spectrographe, venait impressionner une plaque photographique . L'analyse des onze spectres par densitométrie devait nous permettre de déterminer les facteurs de luminance de la dent dans chaque région .

En fait, le manque d'uniformité d'éclairement dans le sens vertical du spectrographe utilisé nous a amené à rejeter cette façon

de procéder pour l'étude des luminances, néanmoins, il nous a été possible de l'utiliser pour celle de la fluorescence . Nous obtenons, d'une part le spectre supérieur qui correspond à l'analyse de la lumière émise par la dent sous l'action du rayonnement U. V. incident et, d'autre part, sur l'une des bandes correspondant à la magnésie l'évolution du fond provoquée par une faible fraction lumineuse non filtrée émise par la lampe conjointement aux variations de sensibilité du film photographique .

Ceci nous a permis de concrétiser, d'une façon plus précise, la répartition spectrale de la fluorescence des dents naturelles et constater des écarts importants dans sa reproduction .

Les résultats obtenus correspondent à ce que l'on a déjà pu observer à l'œil nu .

Alors que les dents naturelles présentent une fluorescence dont le maximum se situe dans le bleu, les dents artificielles fluorescentes sont, pour deux d'entre elles, nettement plus lumineuses que les dents naturelles, la troisième l'étant un peu moins . C'est cette dernière , cependant, dont la fidélité de reproduction est la meilleure en ce qui concerne le phénomène .

En effet, la dent n°1 dont la fluorescence résultante est un jaune verdâtre de forte intensité bien que de faible pureté, présente sous une lumière blanche contenant de l'ultraviolet, une luminance supérieure aux dents environnantes, ce qui la distingue de ces dernières . Cette différence peut être encore accentuée si le récepteur qui procède à l'analyse de la lumière émise présente un maximum de sensibilité dans le jaune vert .

La dent n°2, dans les mêmes conditions, ajoute une fluorescence vert pomme importante à la teinte normale de la dent, ce qui la dénature vis-à-vis des dents voisines avec lesquelles elle s'assortit cependant parfaitement sous un éclairage dépourvu de rayons U. V.

La dent n°3 est celle qui donne les écarts les plus faibles vis-à-vis des dents naturelles auxquelles elle se trouve assortie, quelle que soit la proportion d'U. V. dans la lumière incidente et la sensibilité de l'analyseur qui reçoit la lumière diffusée .

Cet examen qualitatif de la fluorescence nous a fait prendre conscience de l'importance du phénomène vis-à-vis de la teinte en fonction du pourcentage en U. V. de la lumière incidente et eu égard à la faible intensité relative de la lumière émise . Dans le bleu , les

radiations ont de faibles propriétés lumineuses mais une importante efficacité chromatique, ce qui explique les modifications notables de l'aspect des couleurs de surface qui sont constatées .

B - DETERMINATION AU MOYEN DU FLUOROMETRE A RESEAU - SPECTROFLUOROMETRE

Pour déterminer avec plus de précision la longueur d'onde correspondant au maximum de la fluorescence, nous avons utilisé le même montage que pour l'étude des luminances en plaçant la dent sur une glissière inclinée à 60° par rapport aux rayons incidents, l'observation ayant lieu à 30° , c'est-à-dire suivant la géométrie 60/30 . Sur le trajet des rayons lumineux provenant de la lampe au xénon dont le spectre est assez riche en rayons ultraviolets nous avons placé des filtres interférentiels à bande passante étroite après avoir recherché, en utilisant la diffraction due au premier réseau, quelle longueur d'onde excitait, plus particulièrement la fluorescence des dents naturelles.

Entre 3.500 et 4.000 Å , il nous est apparu que la fluorescence passe par un maximum qui correspond à la longueur d'onde excitatrice de 3.650 Å , l'émission ayant lieu en donnant une lumière dont le maximum se situe aux environs de 4.500 Å .

Nous avons toujours conservé la magnésie comme élément de comparaison ce qui nous permet d'éliminer l'influence du fond et de la sensibilité du P.M. sur la détermination de la fluorescence .

L'enregistrement donne la répartition de l'énergie relative de la fluorescence d'une dent comparée à la magnésie .

On voit que le maximum de la lumière émise se trouve bien situé aux environs de 4.500 Å dans ces conditions .

Bien que l'intensité de la fluorescence soit faible par rapport à la lumière excitatrice, cet apport de bleu compense, partiellement, la teinte jaune des dents . Non seulement, elle corrige leur couleur en les faisant apparaître plus blanches, mais ajoute un léger éclat qui est nettement perceptible dans certaines conditions où le pourcentage d'U.V. est plus important, comme c'est le cas en montagne et sur la neige par exemple .

CAT. NO. 4-928 RECORDEX PAPER

AMERICAN INSTRUMENT CO., INC.

8030 GEORGIA AVE. SILVER SPRING, MARYLAND, U.S.A.

Fig. 11

2.5.70

EXCITATION & EMISSION SPECTRA

SAMPLE:

SOLVENT:

CONCENTRATION: mg per ml.

MM. SENSITIVITY. PM TUBE:

LAMP: TEMP. °K

DATE: OBSERVER:

SLIT mm

A

B

C

D

F

SHUTTER PORTS

OPENING

SAMPLE TUBE mm I.D.

RELATIVE INTENSITY

100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800

WAVELENGTH-MILLIMICRONS

Certains auteurs , comme J. de MENT, ont constaté des différences notables de la fluorescence suivant l'âge qui serait responsable d'un glissement de l'émission vers les plus grandes longueurs d'ondes, de même J. A. RADLEY a signalé l'apparition d'une teinte rougeâtre dans certains cas pathologiques .

Pour notre part, les mesures que nous avons effectuées ne nous ont pas permis de constater de différences importantes . Il est vrai que seule nous intéressait l'influence de la fluorescence sur la teinte résultante .

Nous n'avons pas abordé ici les variations de la fluorescence suivant les races, le sexe, l'âge ou l 'état de santé . De même, que pour la teinte , ce ne sont pas des considérations statistiques qui nous préoccupaient, mais uniquement une détermination et une définition aussi précise que possible de ces propriétés .

CONCLUSIONS

Nous avons recherché, par ce travail, à cerner d'un peu plus près la notion de couleur en Odontologie en nous attachant, tout d'abord à préciser les paramètres qui sont susceptibles de définir , plus précisément , ce que l'on entend habituellement par teinte des dents .

Pour cela, il nous a été nécessaire de faire un choix parmi les moyens que nous offraient les mesures physiques, de telle sorte qu'elles puissent être réliées aux impressions physiologiques et psychologiques qui correspondent à celles qu'elles produisent chez la plupart d'entre nous .

La relation entre les valeurs physiques et les impressions ressenties est extrêmement complexe car elle dépend, non seulement de processus physiologiques, mais également psychologiques et même parfois philosophiques .

Il existe une théorie supérieure des couleurs qui pour être plus générale est infiniment plus complexe et d'application beaucoup plus délicate que la théorie élémentaire sur laquelle nous nous sommes apuyé .

Dans ces conditions, il est possible de relier les valeurs physiques aux sensations physiologiques car, à une même répartition spectrale, correspond toujours une même sensation physiologique moyenne, ce qui permet de la définir avec précision sur le diagramme chromatique .

Par la suite, on peut relier ces résultats aux impressions psychologiques en établissant une nouvelle relation entre une valeur physiologique, la réflectance lumineuse et l'effet psychologique qu'elle produit : la leucie .

Le problème se trouve ainsi simplifié et l'étude de la couleur ramenée à celui de l'établissement d'une courbe de répartition spectrale d'où l'on passe à la détermination des coordonnées qui permettent de la situer dans le diagramme chromatique .

L'enregistrement des énergies diffusées par la surface étudiée en fonction des longueurs d'ondes peut donner lieu à de nombreux artéfacts dûs à la géométrie utilisée, à savoir la marche des rayons lumineux incidents et la capture du rayonnement réfléchi .

Une partie de notre travail a été consacrée à déterminer, précisément, les conditions les plus favorables à ces mesures .

Après avoir essayé deux méthodes de réflexion diffuse et contrôlé l'identité du classement des teintes en valeur relative , nous avons constaté leur divergence sur le plan psychologique due à une réflectance par défaut qui aboutissait à des leucies trop faibles .

En utilisant une lumière incidente totalement diffusée, l'observation ayant lieu suivant la normale à la surface dans un montage utilisant une sphère d'intégration, nous sommes arrivé à faire coïncider les mesures avec les sensations physiologiques et psychologiques produites .

Dès lors, il était possible de situer les teintes des dents observées dans le diagramme chromatique et de préciser leurs leucies, ce qui rendait compte des impressions effectivement ressenties à l'observation visuelle .

La plus grande partie des couleurs pouvant être reliée à une couleur spectrale quel que soit le mélange des radiations qui les compose, on conçoit qu'il soit possible de définir la teinte d'une dent par sa couleur dominante (la couleur spectrale correspondante) et son degré de pureté, c'est-à-dire la proportion de lumière colorée par rapport à la lumière totale qu'elle diffuse .

L'indication psychologique correspondant à sa leucie étant donnée par sa réflectance, ces trois paramètres paraissent suffisants pour définir la teinte de façon convenable : D. P. R. (Dominante, pureté, réflectance) .

En agrandissant la région du triangle chromatique correspondant à la situation des teintes dentaires, nous avons pu constater que les variations de celles-ci sont limitées à un secteur allant de

de 572 à 578 mμ pour la dominante et que la perception différentielle des deux couleurs voisines délimitées par les ellipses de MAC ADAM réduit leur nombre à quelques unités . Si l'on tient compte des leucies possibles dans chacun des cas, on aboutit à un nombre restreint de possibilités .

Dès lors, les dents artificielles peuvent avoir leurs teintes de base qui s'échelonnent de façon logique en tenant compte de la dominante, du degré de pureté et pour chacun de ces cas de la leucie correspondante .

Parallèlement à ces considérations, il apparaît que les courbes de répartition spectrale que nous avons obtenues correspondent à une absorption caractéristique dans les courtes longueurs d'ondes . Par conséquent, seules les dents artificielles présentant la même répartition restent comparables aux dents naturelles sous tous les éclairages quel que soit le récepteur qui les analyse .

En effet, tout mélange de couleur permettant d'obtenir , sous l'éclairage du moment, pour un observateur déterminé, une certaine similitude , ne donne lieu qu'à un couple métamère qui se différencie dès que change le récepteur ou la composition de la lumière incidente .

Pour être plus complet, nous avons également, procédé en utilisant le même équipement à des mesures de fluorescence .

Les dents naturelles présentent une fluorescence excitée par les longueurs d'ondes du proche ultraviolet soit 3600 Å . Nous avons défini la bance excitatrice et constaté que la lumière visible de fluorescence était centrée dans le bleu à 4500 Å . Cette dernière vient s'ajouter à la fraction rétrodiffusée et modifie légèrement la teinte et ceci d'autant plus nettement que la fraction ultraviolette de la lumière incidente est plus importante . La teinte apparente devient plus blanche et la luminance en est sensiblement plus élevée .

Pour parvenir à une identité plus parfaite, il paraît donc souhaitable que les dents artificielles soient rendues fluorescentes , mais à condition d'utiliser des fluorophores qui émettent dans la même bande de longueur d'ondes avec la même intensité que les dents naturelles et non pas de façon incohérente , comme nous l'avons montré .

La colorimétrie appliquée à l'Odontologie nous paraît donc, non seulement aboutir à une meilleure reproduction, une désignation plus logique et plus pratique des dents artificielles, mais encore débouche sur l'étude de l'évolution des teintes au cours d'un traitement soit endodontique, soit pharmaceutique ou au cours d'un état pathologique .

Elle peut s'appliquer à la dent elle-même, mais encore à l'évolution des produits d'obturation esthétique et de tout autre matériau subissant un vieillissement naturel dans le milieu buccal aussi bien qu'à l'altération produite par un ciment de scellement ou un support métallique .

Etant donné la complexité du phénomène en lui-même, de la difficulté que l'on rencontre à effectuer des mesures significatives s'opposant à la simplicité de l'observation visuelle directe, on comprend le succès de cette dernière .

Nous avons, au cours de cette étude, montré combien la comparaison visuelle est limitée dans le temps et l'espace et ne peut, en aucun cas, constituer une mesure indiscutable . Nous pensons , par contre, que l'amélioration rapide des moyens, l'accroissement de la sensibilité et la simplification de l'appareillage doit nous permettre la généralisation d'une colorimétrie pratique adaptée à notre spécialité .

BIBLIOGRAPHIE

1- ABNEY - Research in colour vision and the trichromatic theory . Longmans, 1913 .

2- ARMSTRONG W. G. - Florescence of human dentin under ultraviolet radiation .
J. Dent. Res. 41 : 1257, 1962 .

3- A. S. T. M. - Designation E 179. 61 T .
Selection of geometric conditions for measurement of reflectance and transmittance .

4- BENEDICT H. C. - Note on the fluorescence of teeth in ultraviolet rays .
Science 67, 442, 1928 .

5- BENOIT P. et DECAMPS - Etude expérimentale des qualités mécaniques et esthétiques des résines acryliques en prothèse dans leur rapport avec les facteurs de réalisation .
Rev. Odonto Stom., janvier 1952, vol. X, n°1 .

6- BILLMEYER F. W. et SALTZ mann M. - Principes of color Technology John Wiley et Sons, New-York (U. S. A.)

7- BIRREN F. - Application of the Ostwald color system the design of consumer goods .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1944, t. 34, p. 396-399 .

8- BLOTTIAU F. - Colorimétrie .
Editions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale, 165 rue de Sèvres, Paris XVème .

9- BOND M. E. et NICKERSON D. - Color-order systems , Munsell ans Ostwald .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1942, t. 32, p. 709-719 .

10- BOUASSE H. - Vision et reproduction des formes et des couleurs. Librairie Delagrave, 1928 .

11- BOUMA P. J. et KRUITHOF A. A. - Couleur et excitation de couleur .
Revue Technique Philips, Janvier 1947, t. 9, n°1, p. 2-7.

12- BOUMA P. J. - Les couleurs et leur perception visuelle .
Dunod , 1949 .

13- CAITUCOLI P. F. - Luminances et Fluorescences comparées des dents humaines et prothétiques .
Revue d'Odonto-Stomatologie du Midi de la France, 1968, n°2, p. 93-101 .
Conférence faite à Marseille au Congrès de'Odonto-Stomatologie , 1968 .

14- COMMITTEE ON COLORIMETRY - Quantitative data and methods for colorimetry .
Journ. Opt. Soc. Amer., 1944, t. 34, p. 633-688 .

15- COMMETTEE ON COLORIMETRY - Colorimeters and color standards .
Journ. Opt. Soc. of Amer. 1945, t. 35, p. 1-25 .

16- CROMWELL T. Y. - The science of color .
GSA Commihee on colorimetry .

17- DAVIS R. et GIBSON K. S. - Filters for the reproduction of sunlight and daylight and the determination of color temperature . Miscellaneous publication . Bureau of standards , 21 janvier 1931, n°114 .

18- DICKSON G., FORZIATI A. F. , LAWSON M. E. and SCHOONOVER (I. C.) - Fluorescence of teeth : a means of investigating their structure .
J. ADA, 1952, 45 : 661-667 .

19- DONALDSON R. - Spectrophotometry of reflecting materials .
Journ. of scient. instr., 1939, vol. 16, p. 114-117 .

20- EISENBERG M. J. - Phenomena Observed by Subjecting Dental Tissues to ultraviolet rays corresponding to approximately 3950 Å .
Dent. Cosmos 75, 1953, 284 .

21- ESCHER-DESRIVIERES J. - Le système X Y Z des représentations colorimétriques .
Revue d'Optique, 1936, t. 15, p. 182-192 .

22- EVANS R. M. - An introduction to color .
John Wiley et Sons, 1948, New-York (U. S. A.) .

23- FABRY Ch. - Introduction générale à la Photométrie .
Editions de la Revue d'Optique, 1927 .

24- FABRY Ch. - Leçons de Photométrie .
Editions de la Revue d'Optique, 1936 .

25- FABRY Ch. , BLOTTIAU F., BLET G. - Les principes de la photométrie hétérochrome .
Cahiers de Physique, 1944, n°22, p. 37-68 .

26- FLEURY P. - Recherches de photométrie et spectrophotométrie photoélectriques .
Revue d'Optique, 1932, t. 11, p. 385-398 .

27- FLEURY P. - Principes et conventions colorimétriques .
Revue d'Optique, 1938, t. 17, p. 337-349 .

28- FLEURY P. - Colorimétrie par synthèse trichrome .
Bull. de la Soc. Franç. de Physique. Comm. du 17/2/1939, p. 35S - 37S .

29- FLEURY P. et TERRIEN J. - Spectrophotométrie des facteurs de réflexion et de transmission à l'Institut d'Optique (visible, infrarouge et ultraviolet) .

30- FORZIATTI A. F. - KUMPULA J. W. and BARONE J. J. - Tooth Fluorometer .
J. ADA 67, 1963, 663-669 .

31- FOSS C. E., NICKERSON D. et GRANVILLE W. C. - Analysis of the Ostwald . Color system .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1944, t. 34, p. 361-381 .

32- GIBSON K. S. - Spectrophotometry and the Bureau of standards .
Jour. Opt. Soc. of Amer., 1931, t. 21, p. 564-587 .

33- GIBSON K. S. et NICKERSON D. - An analysis of the Munsell color system based on measurements made in 1919 and 1926 .
Jour. Opt. Soc. of Amer., 1940, t. 30, p. 591-608 .

34- GIENN J. J. et KILLIAN J. T. - Trichromatic analysis of the Munsell Book of Color .
Jour. Opt. Soc. of Amer., 1940, t. 30, p. 609-616 .

35- GILLOD J. - Contribution à la solution spectrophotométrique du problème de la mesure des couleurs .
Mesures, février 1944, p. 34642 - mars 1944 , p. 62-72- mai 1944, p. 117-125 .

36- GOUREVITCH M. M. - The geometrical solutions of some color mixture problems .
Jour. Opt. Soc. of Amer., 1945, t. 35, p. 196-198 .

37- GUILD J. - A trichromatic colorimeter suitable for standardisation work .
Trans. Opt. Soc., 1925-1926, vol. 27, p. 106-129 .

38- GUILD J. - The colorimetric properties of the spectrum .
Phil. trans. Roy. Soc. A, 1931, t. 230, p. 149-187 .

39- HALL J. B. - HEFFEREN S. T. , OLSEN N. H. - Study of fluorescent characteristics of extracted human teeth by use of a clinical fluorometer .
Res. Inst. Amer. Dental Ass. and Northwestern University Dental School, Chicago, Illinois 60611 (U. S. A.)
J. Dent. res. 1431, déc. 1970 .

40- HARDING H. G. W. - Illuminants for colorimetry and the colours of of total radiators .
Proc. of the phys. Soc., 1945, t. 57, p. 222-238 .

41- HARDY A. C. - Hand boock of colorimetry .
Cambridge, Masachusset institute of technology, 1936 .

42- HARDY A. C. et WURZUNG F. L. - The theory of three color reproduction .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1937, t. 27, p. 227-240 .

43- HARRISSON G. W. - The measurement of near whites in the paperindustry .
Proc. phys. soc. 1942, 54, p. 209-216 .

44- HARTLES R. L. and LEAVER A. G. - The fluorescence of teeth under ultraviolet .
Irradiation . Biochen J. 54 : 632-638, 1953 .

45- HUNTER R.S. - Photoelectric Tristimulus Colorimetry withe three Filters .
NBS Circular 429, 1942 .

46- ISHIKAWA, IASUYA et coll. - Colorimètre photoélectrique dentaire .
Dent. abst. 15, juin 1970, 338 .

47- JUDD D.B. et WYSZECKI G. - Color in Busines Science and Industry .
John Wiley et Sons, New-York (U.S.A.) 2ème édition, 1963.

48- LAURENS H. et HAMILTON W.F. - The sensibility of the eye to differences in wavelength .
Amer. Journ. Physiol., 1923, t.65, p.547 .

49- LE GRAND Y. - Optique physiologique .
Editions de la Revue d'Optique, 1949, tome 2 : Lumière et Couleurs .

50- LOVICHI A. et WECK J. - Bases colorimétriques de la trichromie. Application au film en couleurs .
Editions de la Revue d'Optique, 1947 .

51- LOVICHI A. et WECK J. - Bases colorimétriques de la Trichromie .
Editions de la Revue d'Optique .

52- MAC ADAM D.L. - Subtractive color mixture and color reproduction .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1938, t.28, p.466-480 .

53- MAC ADAM D.L.) Visual sensitivities to color differences in daylight .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1942, t.32, p. 247-274 .

54- MAC ADAM D.L. - Specification of small chromaticity differences .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1943, t. 33, p.18-26 .

55- MARTIN L.C. - WARBURTON F.L. et NORGAN W.J. - Determination on the sensitivenen of the eye to differences in the saturation of the colours .
Med. Counc. Sp. Rep. Ser.188, London, 1933 .

56- MIDDLETON W.E.K. and SANDERS C.L. - White sphère paint .
Illuminating ingeneering, 1953, 48-254 .

57- MUNSELL A.H. - A color notation, 1961 .
Munsell Color Co Baltimore Md U.S.A.

58- MUNSELL Color Company - Directions for the use of the charts in the Munsell book of color .

59- NEWHALL S.M. - Preliminary report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1940, t. 30, p. 617-645 .

60- OPTICAL SOCIETY of AMERICA - Committee of colorimetry "The Science of color" .
Optical Society of America Washington DC U.S.A.

61- Preparation and Colorimetric properties of a magnesium oxide reflectance standard .
Letter-circular n°547. Nat. Bur. of standards, 17 mars1939.

62- RADLEY J.A. and GRANT J. - Fluorescence analysis in ultraviolet light .
D. van Nostrans Company. Inc. 1939, New-York .

63- SAFFRE E. - La Colorimetrie .
Peintures, pigments, vernis, 1945, vol. 21, p. 66-83 .

64- SELLING XH.X. , FRIELE L.F.C. - Whiteness relations and their applications .
Appl. Sci. Res. Vol. B1, 1950, p. 453-476 .

65- STILES W.S. et CRAWFORD B.H. - The Luminous efficiency of rays entering the eyepupil at different points .
Proc. of de Royan Soc. of London B, vol. 112, 1932-1933 .
p. 428-450 .

66- STILES W.S. - The luminous efficiency of monochromatic rays entering the eye pupil at different points and a new colour effect .
Proc. of the royan of London, B, vol. 123, 1937, p. 90-118.

67- TARNAY F. - Définition de la température de couleur des sources lumineuses fluorescentes .
Bull. de la Soc. Française des Electriciens, 1946, 6ème série, t. VI, p. 468-475 .

68- TYLER J.E. et HARDY A.C. - An Analysis of the original Munsell color system .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1940, t.30, p.587-590 .

69- WIETMANN M.R. , BESIC J.R. F.C. and KELLER O. - Application of dispersion staining to the study of refractive index of dental enamel.
J. Dent. Res. 49, 174, février 1970 .

70- WRIGHT W.D. et PITT F.H.G. - Hue discrimination in normal colour vision .
Proc. Phys. Soc. London, 1934, t.46, p.459-473 .

71- WRIGHT W.D. - The measurement of colour.
London, 1944, A. Hilger .

72- WRIGHT W.D. - The measurement of color .
Mac Millan Compagny, 1964, New-York (U.S.A.).

73- YVON G., RIBAUD G., BAYLE A. - La spectrophotométrie visuelle .
C.R. des Réunions de l'Institut d'Optique, 18 juin 1935 .

74- ZEISHOLD H. - Philosophy of the Ostwald color system .
Journ. Opt. Soc. of Amer., 1944, t.34, p. 355-360 .

EDITIONS BERGERET - 2, rue Bergeret - 71, rue Leyteire - 33000 BORDEAUX
Tél. 91.12.59